

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA METÁLICOS PARA UNA
EDIFICACIÓN DE BAJA ALTURA DE CONCRETO ARMADO**

Tesis para optar el Grado de Magíster, que presenta el Ingeniero Civil

JUAN CARLOS SEGOVIA DAVID

ASESOR: Dr. VÍCTOR I. FERNÁNDEZ-DÁVILA

Lima, abril del 2016

RESUMEN

La filosofía de la mayoría de normas de diseño sismorresistente señala que frente a un sismo severo la edificación no colapse y frente a sismos moderados sufran daños reparables. Pero se ha evidenciado que muchas edificaciones sufren daños irreparables frente a sismos moderados y colapso total frente a sismos severos. Los sistemas de protección sísmica resultan una buena alternativa para reducir los daños estructurales empleando diversos mecanismos, uno de estos son los disipadores de energía metálicos.

En esta tesis se muestra el reforzamiento con disipadores de energía metálicos tipo ADAS en un edificio de cinco niveles de concreto armado en Lima. Se revisaron las principales propiedades y principios del disipador, posteriormente se modelaron las vigas, columnas y muros de concreto armado con propiedades no lineales basadas en la metodología FEMA 356 y ASCE 41-06. Se utilizó el programa Perform 3D para realizar análisis dinámico no lineal tiempo historia empleando registros de aceleraciones de Lima y escalados a un valor de PGA igual a 0.5g.

Los resultados mostraron que la estructura reforzada con disipadores tiene una reducción variable de los desplazamientos laterales llegando a ser un 53% (ultimo nivel) como máximo en el centro de masas (C.M.). En los muros de concreto se consiguió reducir la deformación inelástica del acero de refuerzo, llegando hasta un 70% como máximo y tener un comportamiento lineal por corte. También se observó un cambio en la energía distribución y en los periodos de la edificación, Se demostró que los disipadores ADAS producen una disminución de deformaciones en la estructura reduciendo los daños estructurales.

ABSTRACT

The philosophies of seismic design codes are avoided building collapse in strong earthquake and suffer repairable damage in moderate earthquakes. Nevertheless has been evidenced that many buildings suffered irreparable damages against moderate earthquakes and total collapse against severe earthquakes. Seismic protection systems are a good alternative to reduce structural damage using various mechanisms, one of these metallic energy-dissipating devices.

This thesis showed the reinforcement with energy dissipating metallic type ADAS in a five-story building of reinforced concrete in Lima. The main properties and device principles has been revised; afterwards beams, columns and reinforced concrete walls were modeled with nonlinear properties based on FEMA 356 and ASCE 41-06 methodology. The Perform 3D program was used to doing inelastic dynamic time history analyses using earthquake records of Lima and scaled to a value equal to 0.5g PGA.

The results showed that the reinforced structure equipped with dissipative has a variable reduction of the lateral displacements, decreasing 53% (last level) maximum in the center of mass (C. M.). In reinforced concrete walls, the inelastic deformation of reinforcing steel was reduced as maximum a 70% and getting a linear behavior by shear force. In addition, a change was observed in the energy distribution and building periods, it was demonstrated that ADAS device cause a decrease in the structure deformation reducing structural damage.

AGRADECIMIENTO

A mi familia por su constante apoyo en los momentos difíciles, Gracias.

Agradezco a todos los profesores de la Maestría de Ingeniería Civil, al laboratorio de cómputo de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú y a mi asesor de Tesis.



INDICE

LISTA DE TABLAS.	1
LISTA DE FIGURAS.	2
CAPITULO I.	6
1. INTRUDUCCIÓN	6
1.1. ANTECEDENTES	6
1.2. JUSTIFICACION	7
1.3. OBJETIVOS	7
1.3.1. Objetivo general.	7
1.3.2. Objetivo específico.	7
CAPITULO II.	9
2. DISIPADORES DE ENERGIA	9
2.1. DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN UN SISTEMA.	9
2.2. SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES.	11
2.2.1 Disipadores de energía.	12
2.2.1.1 Disipadores dependientes del desplazamiento.	14
2.2.1.2 Disipadores dependientes de la velocidad.	17
CAPÍTULO III	19
3. DISIPADORES METÁLICOS TIPO ADAS	19
3.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS BÁSICAS DE DISIPADORES ADAS.	19
3.2. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES ADAS.	23
3.2.1 Modelo de Ramberg-Osgood	23
3.2.2 Modelo de Bouc-wen	24
3.2.3 Modelo Bilineal	25
3.3. FACTORES DE INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES ADAS.	27
3.3.1 Soporte de los disipadores ADAS	27
3.3.2 Rigidez elástica del elemento ADAS	28
3.3.3 Relación SR	30
3.3.4 Amortiguamiento viscoso equivalente	30

CAPÍTULO IV	33
4. MODELAMIENTO NO LINEAL DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	33
4.1. RELACIÓN DE FUERZA-DEFORMACIÓN BAJO CARGAS CÍCLICAS.	33
4.2. MODELOS NO LINEALES.	37
4.3. MODELAMIENTO DE VIGAS.	38
4.4. MODELAMIENTO DE COLUMNAS.	41
4.5. MODELAMIENTO DE MUROS.	43
4.6. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS NO LINEAL.	45
4.7. MODELAMIENTO DE DISIPADOR ADAS.	48
CAPÍTULO V	52
5. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO MULTIFAMILIAR	52
5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN.	52
5.2. MODELAMIENTO DE LA EDIFICACIÓN.	54
5.3. REGISTROS CONSIDERADOS PARA EL ANÁLISIS.	56
5.4 FACTORES PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	61
5.4.1 Rotaciones	61
5.4.2 Deformaciones	62
5.5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA EDIFICACIÓN SIN DISIPADOR	65
5.6 REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON DISIPADORES ADAS	69
5.6.1 Reforzamiento en H2	69
5.6.2 Reforzamiento en H1	78
5.6.3 Deformaciones y rotaciones finales máximas	79
5.7 MODIFICACIÓN EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL	80
5.8 IMPLEMENTACIÓN DE DISIPADORES	85
5.8.1 Viabilidad de la construcción de disipadores ADAS	86
CAPÍTULO VI	89
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.1. CONCLUSIONES.	89
6.2. RECOMENDACIONES.	90
BIBLIOGRAFIA	91
ANEXO A: Modelación de vigas en PERFORM 3D	95
ANEXO B: Modelación de columnas en PERFORM 3D	100
ANEXO C: Modelación de muros en PERFORM 3D	103
ANEXO D: Calculo de esfuerzo de corte para muros	107
ANEXO E: PLANOS	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen de las características principales de los dispositivos disipadores pasivos de energía para la de protección sísmicas, adaptado de Symans et al. (2008).	13
Tabla 4.1: Parámetros de degradación cíclico de vigas para $l_v/h=4.0$ en Perform 3D (Naish, 2010).	41
Tabla 4.2: Propiedades de vigas y columnas.	49
Tabla 4.3: Masa total por niveles.	49
Tabla 4.4: Propiedades de los disipadores.	50
Tabla 5.1: Masas utilizadas en la modelación.	54
Tabla 5.2: Aceleraciones y periodos de retorno (Muñoz et al., 2000).	57
Tabla 5.3: Características de los registros sísmicos para Lima.	57
Tabla 5.4: Deformaciones límites para el comportamiento estructural.	61
Tabla 5.5 Propiedades para disipador ADAS de 7 placas en eje D.	70
Tabla 5.6: Desplazamientos laterales en centro de masa (C.M.) sentido H2.	72
Tabla 5.7: Desplazamientos laterales en PL-01 sentido H2.	73
Tabla 5.8: Desplazamientos laterales en centro de masa (C.M.) sentido H1.	78
Tabla 5.9: Desplazamientos laterales en PL-04 sentido H1.	78
Tabla 5.10: Comparación de rotaciones máximas.	80
Tabla 5.11: Deformaciones máximas en el concreto y acero.	80
Tabla 5.12: Comparación de periodos.	81
Tabla 5.13: Fuerza basal en H2 (sin ADAS).	82
Tabla 5.14: Fuerza basal en H2 con ADAS.	82
Tabla 5.15: Fuerza basal en H1.	84
Tabla 5.16: Comparación de amortiguamiento equivalente.	85
Tabla A.1: Valores de momentos y curvaturas para viga VT-06-A.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: modelo SDOF.	9
Figura 2.2: Distribución del Input de energía.	11
Figura 2.3: Clasificación del control de vibraciones.	12
Figura 2.4: Geometría de amortiguadores metálicos	14
Figura 2.5: Disipadores de flexión en U.	15
Figura 2.6: Disipador ADAS y comportamiento histerético (De la Llera et al., 2004).	15
Figura 2.7: Disipador TADAS y comportamiento histerético (Tsai et al., 1993).	16
Figura 2.8: Disipador Honey-Comb y comportamiento histerético.	16
Figura 2.9: Disipador de fricción Pall (Pall and Marsh, 1982).	17
Figura 2.10: Disipador Viscoelástico tipo 3M.	17
Figura 2.11: Disipadores viscosos: Constantinou y tipo Taylor.	18
Figura 2.12: Disipadores viscosos en edificios.	18
Figura 3.1: Ensayo de carga lateral cíclica de dispositivo ADAS.	19
Figura 3.2: Deformación y esfuerzo en disipadores ADAS.	20
Figura 3.3: Comportamiento fuerza - deformación de dispositivo ADAS.	20
Figura 3.4: Caracterización de la geometría del disipador ADAS.	21
Figura 3.5: Modelo de Ramberg-Osgood.	23
Figura 3.6: Lazos de histéresis generados por modelo Bouc-Wen.	25
Figura 3.7: Variación de K_h ("a") según Xia C. et al. (1990).	26
Figura 3.8: Modelo Bilineal para dispositivos ADAS.	26
Figura 3.9: Sistema pórtico simple y disipador ADAS	27
Figura 3.10: Relación de Φ - B/D.	29
Figura 3.11: Relación de fuerza - B/D, para pórtico de 10 niveles con SR=2.	29
Figura 3.12: Desplazamientos máximos - Δ_y , para pórtico de 10 niveles.	30
Figura 3.13: Relación de fuerza en la base - Δ_y , para pórtico de 10 niveles.	30
Figura 3.14: β como función de propiedades de pórtico estructural. (Kelly, 2001).	31
Figura 3.15: β como función de propiedades de disipador muy rígido. (Kelly, 2001).	32
Figura 4.1: Relaciones de esfuerzo-deformación para vigas (ACI 318,1989).	33
Figura 4.2: Modelos histereticos para elementos de concreto armado.	34

Figura 4.3: Curva backbone (Ghodrati Amiri et al., 2009).	35
Figura 4.4: Idealización de curva backbone (FEMA 356,2000).	35
Figura 4.5: Relación de fuerza-desplazamiento en PERFROM 3D.	36
Figura 4.6: Plasticidad concentrada para elemento viga (Otani, 1980).	36
Figura 4.7: Modelos idealizados para elementos viga-columna (NEHRP, 2010).	37
Figura 4.8 modelo Chord rotation en PERFORM 3D.	37
Figura 4.9 elementos FEMA viga y columna en PERFORM 3D.	38
Figura 4.10 relación fuerza-desplazamiento en elemento FEMA beam, Concrete Type”.	38
Figura 4.11: Relación fuerza-desplazamiento para acero estructural (Mander, 1984).	39
Figura 4.12 modelo de concreto confinado (Park et al., 1982).	39
Figura 4.13: Relación momento-curvatura para una sección rectangular.	40
Figura 4.14: Degradación cíclica.	41
Figura 4.15: Factores de energía y modelo de Takeda en “FEMA beam, Concrete Type” en PERFORM 3D.	41
Figura 4.16: Elemento “FEMA Column, Concrete Type”.	42
Figura 4.17: Elemento fibra para muros (adaptado PEER/ATC, 2010 y PERFORM 3D “Components and Elements”)	43
Figura 4.18: Parámetros de acero para elementos fibra en PERFORM 3D.	44
Figura 4.19: Parámetros de concreto confinado para elementos fibra en PERFORM 3D.	44
Figura 4.20: Parámetros de concreto simple para elementos fibra en PERFORM 3D.	45
Figura 4.21: Diafragmas rígidos y nudos maestros en PERFORM 3D.	46
Figura 4.22: Ensayo de disipadores ADAS (Whittaker et al., 1989).	48
Figura 4.23: Modelamiento del pórtico con disipadores ADAS (Whittaker et al., 1989).	49
Figura 4.24: Modelamiento de ADAS con 7 placas.	50
Figura 4.25; Desplazamientos laterales en pórtico de ensayo (Whittaker et al., 1989).	51
Figura 4.26 Comportamiento histerético para disipador ADAS de 7 placas.	51
Figura 4.27 comparaciones de desplazamientos, Chile 1985 (Su and Hanson, 1990).	51
Figura. 5.1: Características de la edificación de baja altura.	52
Figura. 5.2: Vigas y columnas en la edificación a analizar.	53
Figura. 5.3 Muro de concreto PL-01.L-01.	54

Figura. 5.4: Valores considerados para vigas de acople por corte ($\ln/h \leq 4$).	55
Figura. 5.5: Propiedades no lineales por corte en PERFORM 3D.	55
Figura. 5.6: Componente no lineal por corte en PERFORM 3D.	56
Figura. 5.7: Modelamiento de la estructura en PERFORM 3D.	56
Figura 5.8: Gráficos de registros sísmicos para Lima.	58
Figura 5.9: Espectros de respuesta vs espectro de diseño E030.	59
Figura 5.10: Funciones de intensidad de SIMQKE (Gasparini 1976).	60
Figura 5.11: Señal sintética para un PGA 0.5g creado por el programa SMQKE	60
Figura 5.12: Comparación de espectro de respuesta norma E030-SIMQKE	60
Figura 5.13: Rotaciones en vigas, columnas y muros adaptado de (PEER/ATC, 2010) y (CSI, 2011).	61
Figura 5.14: Definición de deformaciones limites en PEFORM 3D.	62
Figura 5.15: Modos de falla en muros esbeltos (FEMA P-751).	62
Figura 5.16: Modos de falla en muros bajos (Paulay et al., 1982).	63
Figura 5.17: Calculo de esfuerzo maximo de corte para PL-01 e ingreso de datos en PERFORM 3D.	64
Figura 5.18: Deformaciones máximas en muros (Powell G., 2007).	65
Figura 5.19: Control de deformaciones en muros (adaptado de Department of Civil Engineering, IIT Kanpur).	65
Figura 5.20: Deformaciones limites en H1.	66
Figura 5.21: Deformaciones limites en H2.	66
Figura 5.22: Deformaciones en el acero excedidas en PL-01 para S6 en sentido H2.	67
Figura 5.23: Deformaciones limites en H2 para señal sintética.	67
Figura 5.24: Distribución de la energía de entrada E_I .	68
Figura 5.25: Secuencia de diseño de disipador ADAS.	69
Figura 5.26: Zona a reforzamiento con disipador ADAS sentido H2.	69
Figura 5.27: Reforzamiento y dimensiones finales de disipadores ADAS en ejes C y D.	71
Figura 5.28: Desplazamientos laterales del C.M en H2.	73
Figura 5.29: Desplazamientos laterales de PL-01 en H2.	74
Figura 5.30: Comparación de desplazamientos laterales del C.M. y PL-01 en H2.	76
Figura 5.31: Reducción de sollicitaciones en dirección H2.	76
Figura 5.32: Comportamiento de disipadores en dirección H2 para S6.	77

Figura 5.33: Comparación de desplazamientos laterales de PL-04 en H1	79
Figura 5.34: Distribución de la energía E_1 en H2.	81
Figura 5.35: Distribución fuerza cortante (ton-f) en H2.	83
Figura 5.36: Distribución fuerza cortante (ton-f) en H1.	83
Figura 5.37: Cálculo aproximado de amortiguamiento viscoso equivalente-Perform-3d.	84
Figura 5.38: Curvas esfuerzo deformación para el acero (American Welding Society (AWS)).	85
Figura 5.39: Curvas esfuerzo deformación para acero A36 (Alonso, 1989).	86
Figura 5.40: Geometría final del dissipador ADAS.	87
Figura 5.41: Características de planchas gruesas LAC (Aceros Arequipa).	87
Figura 5.42: Detalles de colocación de refuerzos de sistemas V invertidos, adaptado de (D' Aniello, 2007).	88
Figura A.1: Geometría de la viga VT-06-A.	95
Figura A.2: Diagrama momento-curvatura en sentido positivo para viga VT-06-A.	97
Figura A.3 viga VT-06-A.en PERFORM 3D con "FEMA beam, Concrete Type".	98
Figura A.4 componente no lineal para elemento Viga en PERFORM 3D.	99
Figura B.1 Características geométricas de columna C-02.	100
Figura B.2 Diagrama P-M-M para columna C-02 en sus ejes principales.	100
Figura B.3 Diagrama P-M-M para una sección de columna.	101
Figura B.4 modelación de columnas en PERFORM 3D.	101
Figura B.5 componente no lineal para elemento Columna en PERFORM 3D.	102
Figura C.1 modelación y división de fibras en muros.	103
Figura C.2 modelación con "Fixed Size".	104
Figura C.3 modelación con "Auto Size".	104
Figura C.4 corte efectivo G_e .	105
Figura C.5 Componente de muro para acero distribuido "Auto Size".	105
Figura C.6 Componente de muro "Fixed Size".	106

CAPITULO I.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La filosofía de la mayoría de normas de diseño sismorresistente es que frente a un sismo severo la edificación no colapse y frente a sismos moderados sufran daños reparables. Pero se ha evidenciado que muchas edificaciones sufren daños irreparables frente a sismo menores y colapso total frente a sismos severos.

Los sistemas de protección sísmica resultan una buena alternativa para reducir los daños estructurales empleando diversos mecanismos, uno de estos son los disipadores de energía metálicos. Estos sistemas se clasifican en tres grupos (Soong and Dargush, 1997): Pasivos, Semi-activos y Activos. Los sistemas Pasivos a su vez se clasifican en tres tipos: Aisladores sísmicos, Disipadores de energía y efecto de masa adicional.

Los Disipadores de Energía se clasifican generalmente en: Viscoelásticos e Histeréticos. Los disipadores metálicos pertenecen al grupo de disipadores histeréticos, y se desarrollaron en Nueva Zelanda a comienzos del año 1970. Los más conocidos son: ADAS (Added Damping and Stiffness) y TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness). Una de las aplicaciones más utilizadas de los disipadores viscoelásticos es en EEUU en las Torres gemelas donde se ubicaron 100 disipadores por planta (Bozzo and Barbat, 1999) para controlar los efectos del viento.

Los disipadores metálicos se han utilizado exitosamente en los reforzamientos estructurales de edificios. En Japón fueron implementados en edificios de 5, 9, 15 y más de 15 pisos; por ejemplo el Oujiseishi Headquarters Building ubicado en Tokyo que posee 15 niveles y tiene implementado el sistema de disipación de energía tipo ADAS. El edificio Izazaga de 12 pisos que fue construido en 1970s en la ciudad de México y fue reforzado en 1990 con el sistema ADAS, se obtuvo una reducción máxima del 40% de desplazamiento relativos en un análisis no lineal (Sadek et al, 1996). El Hospital Cardiológico de la ciudad de México de 6 pisos también fue reforzado con sistema ADAS y se verificó una reducción importante en desplazamientos de pisos (Craig et al, 2002). En EEUU el primer edificio con este reforzamiento fue el Wells Fargo Bank de 2 pisos de

concreto armado que tenía un sistema sin ductilidad, construido en 1967 y reforzado en el 1992 con el sistema ADAS logrando una reducción del 50% en desplazamientos laterales (Perry et al., 1993). Los disipadores TADAS son usados mayormente es en edificaciones nuevas como el Core Pacific Shopping City en Taipéi.

En el Perú uno de los primeros equipamientos de disipadores metálicos en estructuras fue con el tipo SL (Shear Link) desarrollado por Bozzo y Barbat (1999) que se implementó en el casino Mubarak en el año 2004.

1.2 Justificación

Durante la ocurrencia de sismos fuertes las estructuras resisten disipando energía en sus elementos principales (vigas, columnas y placas) alcanzando deformaciones superiores a su límite elástico, sufriendo daño estructural. Con el aumento del amortiguamiento estructural por efecto de disipadores se logra reducir los esfuerzos en elementos principales evitando que incursionen en grandes deformaciones inelásticas.

En una edificación equipada con disipadores de energía reducirá sus desplazamientos laterales, de esta forma reducirá los daños en las estructuras principales mejorando su funcionabilidad después de un movimiento sísmico. En el Perú especialmente en Lima, las edificaciones de baja altura generalmente tienen entre 3 a 8 pisos siendo usados mayormente como viviendas multifamiliares y oficinas, es importante poder implementar estos dispositivos en dichas edificaciones para reducir su vulnerabilidad ante sismos severos y poder disminuir daños irreparables.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseño de disipadores de energía metálico tipo ADAS para la reducción de daños estructurales en una edificación existente de concreto armado de baja altura.

1.3.2. Objetivo Específicos

- a) Realizar el análisis dinámico no lineal de una edificación existente de concreto armado considerando disipadores.

- b) Empleo de la herramienta computacional Perform 3D para el análisis sísmico considerando la acción de sismos severos.
- c) Hacer un análisis comparativo para un edificio con disipadores y sin disipadores (ADAS).
- d) Determinar los principales parámetros en la modelación no lineal de vigas, columna y muros utilizando el Perform -3D.
- e) Investigar en el mercado peruano la implementación de disipadores metálicos.

El presente trabajo se organiza en 6 capítulos y 5 anexos. En el capítulo 1 se presenta los antecedentes, justificación y los objetivos.

El capítulo 2 presenta los principios básicos de los sistemas de reducción de vibraciones, la clasificación de los disipadores de energía y su estado del arte.

El capítulo 3 se muestra las propiedades básicas del disipador ADAS y los principales modelos de comportamiento histerético para su modelamiento.

En el capítulo 4 muestra básicamente las principales consideraciones que se deben de tener en consideración para la modelación no lineal de vigas, columnas; muros de concreto en el programa PERFORM 3D usando las recomendaciones de FEMA 356 y ASCE-41. Finalmente se presenta una comprobación del modelamiento del disipador ADAS en PERFORM 3D obteniendo resultados confiables.

En el capítulo 5 se presenta un caso de estudio en donde se ha logrado reforzar una edificación de 5 niveles de concreto armado con disipadores ADAS y se ha podido comprobar la reducción de solicitaciones (daños estructurales) en la estructura que era el objetivo principal.

El capítulo 6 corresponde a las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

Los anexos A, B, C y D se muestran los pasos y consideraciones para la modelación no lineal de vigas, columnas y muros en PERFORM 3D y el anexo E las principales secciones de los elementos estructurales.

CAPITULO II.

2. DISIPADORES DE ENERGÍA

2.1 Distribución de la energía en un sistema.

Cuando una edificación es afectada por un movimiento sísmico, una cantidad de energía es introducida en la estructura, para disiparla se producen deformaciones y daños estructurales de acuerdo la magnitud del movimiento. Las normas de diseño sismorresistente aceptan daño estructural (deformaciones inelásticas) para disipar la energía introducida por el sismo.

Si consideramos un sistema dinámico de masa concentrada de un grado de libertad (SDOF) sometido a un movimiento en la base (Fig. 2.1) la ecuación de movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s = -m\ddot{u}_g(t) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

M : Masa del sistema.

c : Amortiguamiento lineal.

f_s : Fuerza restauradora del sistema.

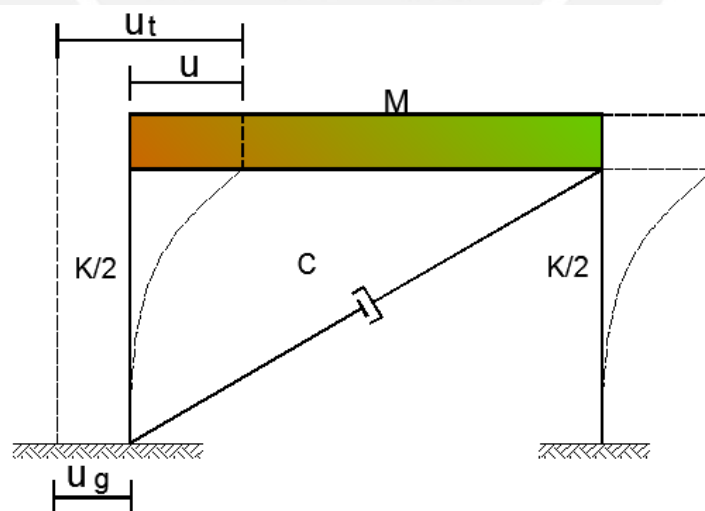


Figura 2.1: modelo SDOF.

En la ecuación (2.1) multiplicando en ambos lados por du ($=\dot{u}dt$) e integrando sobre toda la duración del sismo “ t ” obtenemos la ecuación siguiente:

$$\int_0^t m\ddot{u}\dot{u} dt + \int_0^t c\dot{u}^2 dt + \int_0^t f_s\dot{u} dt = \int_0^t -m\ddot{u}_g(t)\dot{u} dt \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\frac{m\dot{u}^2}{2} + \int_0^t c\dot{u}^2 dt + \int_0^t f_s\dot{u} dt = -m \int_0^t \ddot{u}_g(t)\dot{u} dt \quad (\text{Ec. 2.3})$$

La ecuación (2.3) se puede definir los siguientes términos:

La energía cinética del sistema está dada por:

$$E_k = \frac{m\dot{u}^2}{2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La energía de amortiguamiento viscoso es:

$$E_v = \int_0^t c\dot{u}^2 dt \quad (\text{Ec. 2.5})$$

La energía absorbida por el sistema está asociada a la fuerza “ f_s ”, que está formado por la energía elástica recuperable E_s y la energía histerética (inelástica) E_h .

$$\int_0^t f_s\dot{u} dt = E_s + E_h \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La energía introducida al sistema producido por el movimiento sísmico es:

$$E_I = \int_0^t -m\ddot{u}_g(t)\dot{u} dt \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Finalmente se obtiene la ecuación de distribución de la energía:

$$E_I = E_k + E_s + E_h + E_v \quad (\text{Ec. 2.8})$$

La ecuación (2.8) se puede representar gráficamente en la Fig. 2.2 donde el color rojo pertenece a E_h , naranja a E_v , azul a E_k y celeste a E_s .

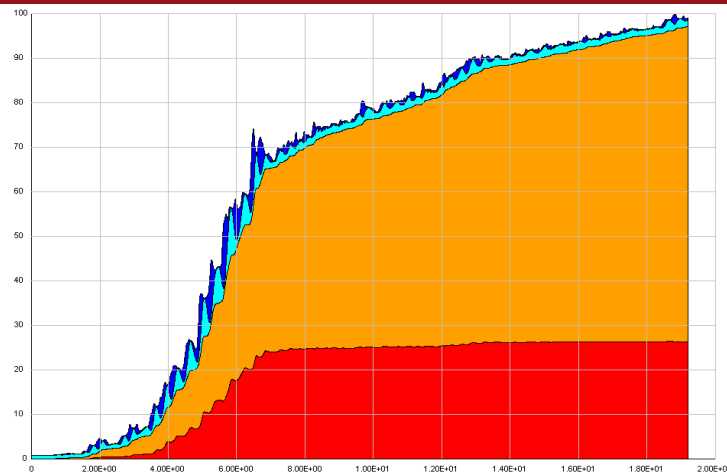


Figura 2.2: Distribución del Input de energía.

La deducción de la ecuación (2.8) se ha hecho para la energía relativa en un sistema, también se puede hacer para la energía absoluta partiendo del desplazamiento total u_t ; ambas muestran la distribución de energía y para diseños sísmicos la más usada es la energía relativa. El objetivo principal en el uso de disipadores de energía es aumentar y/o reemplazar E_h y E_v a través de dispositivos suplementarios, de esta forma se reducen las deformaciones en los componentes principales de la estructura (vigas, columnas y muros).

2.2. Sistemas de control de vibraciones.

Los sistemas de control de vibraciones (SCV) tienen por objetivo principal reducir y controlar los desplazamientos en una estructura producida por un movimiento sísmico, esta reducción se hace en zonas localizadas y determinadas con la gran ventaja de poderlas reparar y/o cambiar. Básicamente los SCV se dividen en tres grupos (Fig. 2.3) sistemas pasivos, semiactivos y activos.



Figura 2.3: Clasificación del control de vibraciones.

- Sistemas pasivos: actúan una vez que se inicia los desplazamientos en la estructura producto del movimiento sísmico, no requieren energía externa y pueden ser básicamente: aisladores, disipadores de energía y sistemas de masas conectadas.
- Sistemas activos: son dispositivos que actúan imponiendo fuerzas restituidas en zonas determinadas (generalmente con actuadores dinámicos) durante el sismo y para esto requieren energía externa.
- Sistemas semiactivos: combinan un los sistemas pasivos y los activos logrando reducir la complejidad de un sistema activo.

A continuación se mostrará una revisión de las principales características y clasificación de los disipadores de energía debido a que es el sistema elegido para realizar la protección sísmica.

2.2.1 Disipadores de energía.

En la actualidad existen una gran variedad de disipadores de energía en todo el mundo, una forma muy práctica de clasificarlos es la usada por (Symans et al. ,2008) mostrado en la Tabla 2.1, donde se clasifica en dos grandes grupos: disipadores dependientes de la velocidad (fluido viscoso y sólido viscoelásticos) y dependientes del desplazamiento (metálicos).

Tabla 2.1: Resumen de las características principales de los dispositivos disipadores pasivos de energía para la de protección sísmicas, adaptado de Symans et al. (2008)

	Dependientes de la velocidad		Dependientes del desplazamiento	
	Fluido viscoso	Sólido Viscoelásticos	Fluencia de metales	Fricción
Esquema Básico				
Comportamiento histerético idealizado				
Modelo físico idealizado				
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Se activa con desplazamientos pequeños. -Fuerza restauradora mínima. -Para un amortiguamiento lineal, se simplifica el modelo del amortiguador. - No depende de la temperatura del ambiente ni de las frecuencias altas aplicadas. -Se ha probado ampliamente su desempeño en aplicaciones militares 	<ul style="list-style-type: none"> -Se activa con desplazamientos pequeños. -Suministra una fuerza restauradora. - Comportamiento lineal, por lo tanto se puede simplificar su modelación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento histerético estable. - No depende de la temperatura del ambiente. - Materiales y comportamiento son conocidos para los ingenieros. - Comportamiento confiable durante largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta disipación de energía por ciclo. - No depende de la temperatura del ambiente.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Posible fuga del fluido.(relacionado con la confiabilidad). 	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de deformación limitada -Sus propiedades dependen de la temperatura del ambiente ni de las frecuencias aplicadas -Posible desprendimiento y flujo del material viscoelásticos (relacionado con la confiabilidad). 	<ul style="list-style-type: none"> -Dispositivo dañado después del sismo; podría requerir reemplazo. -Comportamiento no lineal; podría requerir de un análisis no lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las condiciones de la interface de deslizamiento podrían cambiar con el tiempo (relacionado con la confiabilidad). -Comportamiento No lineal muy marcado; podría requerir de un análisis no lineal – modal. -Hay desplazamientos permanentes si no actúa una fuerza restauradora.

2.2.1.1 Disipadores dependientes del desplazamiento.

También conocidos como disipadores metálicos o hysteréticos tiene una característica principal de disipar la energía producida por un sismo a través de deformaciones inelásticas ocurridas en el disipador, estas deformaciones pueden ser por flexión, cortante, fricción principalmente. Los materiales más usados son los aceros estructurales, cobre y aluminio. Los primeros disipadores metálicos comenzaron en 1970s y fueron ensayados por (Kelly at el., 1972).

Disipadores de Flexión

Los primeros 3 tipos de disipadores fueron propuestos por (Kelly at el., 1972) y (Skinner at el., 1975) que se muestra en la Fig. 2.4 y son:

- Placas en forma de U (Fig. 2.4a).
- Disipadores torsionales (Fig. 2.4b).
- Disipadores de flexión (Fig. 2.4c).

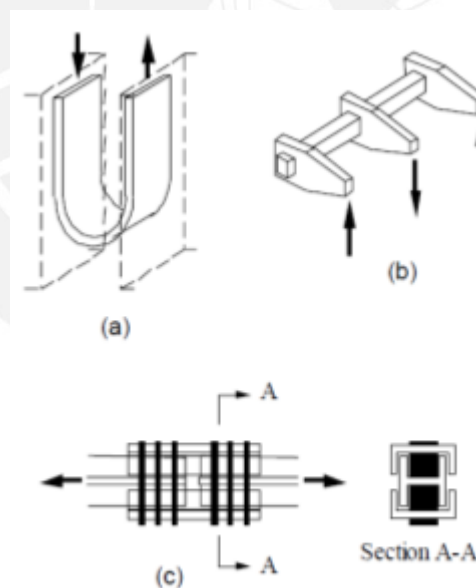


Figura 2.4: Geometría de amortiguadores metálicos

El sistema de placas en U disipa la energía por flexión pura al enrollarse la barra y el efecto del desplazamiento relativo entre sus extremos.

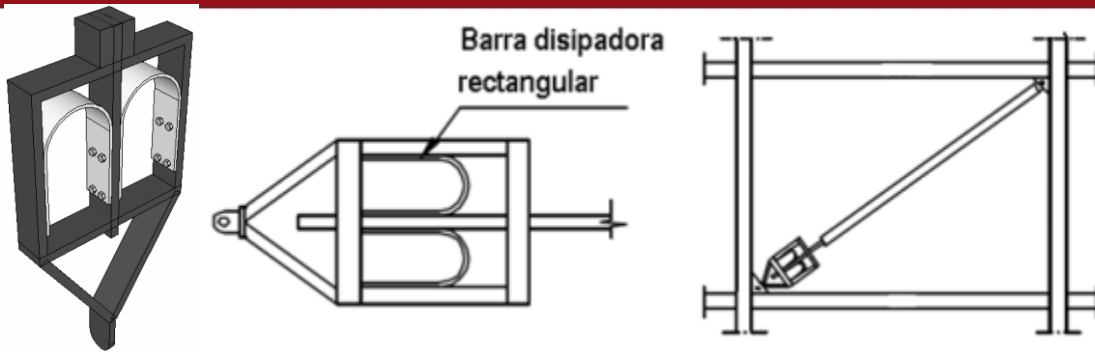


Figura 2.5: Disipadores de flexión en U.

Los disipadores ADAS (Added Damping and Stiffness) son uno de los más estudiados en la protección sísmica, diferentes ensayos (Berman and Goel, 1987), (Alonso, 1989) y (Whittaker et al., 1989) mostraron un excelente comportamiento histerético, reducción de desplazamientos y el periodo fundamental; aumenta la fuerza cortante para disipadores de acero estructural A36. Disipadores ADAS hechos de cobre también tienen un excelente comportamiento como lo demostró (De la Llera et al., 2004) mostrado en la Fig. 2.6. Las primeras implementaciones en estructuras fueron en Nueva Zelanda (Skinner et al., 1980) y Japón (Fujita, 1991), en México (Martínez et al., 1993) y USA (Perry et al., 1993).

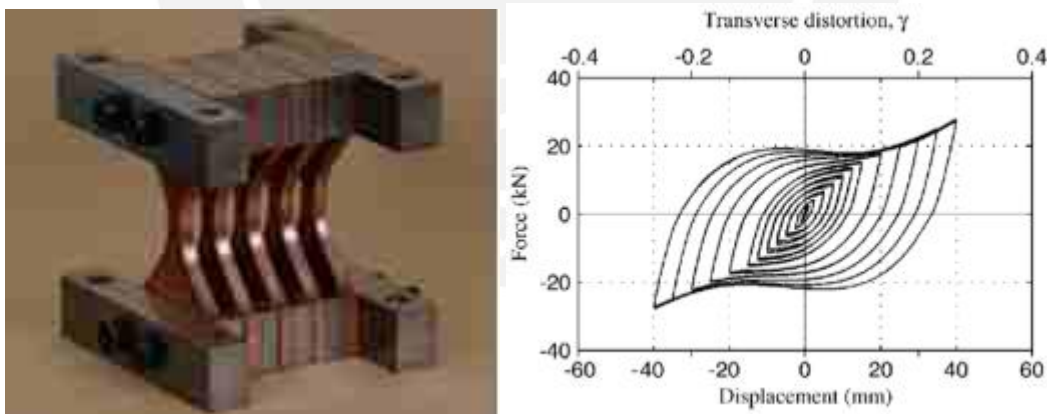


Figura 2.6: Disipador ADAS y comportamiento histerético (De la Llera et al., 2004).

Los disipadores TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) tienen la característica de estar formado por placas triangulares que produce un comportamiento similar a los ADAS como se muestra en la Fig. 2.7 (Tsai et al., 1993). Una característica es que estos disipadores no toman cargas de gravedad al no estar empotrado en sus dos nodos y hace que su respuesta sea muy predecible.

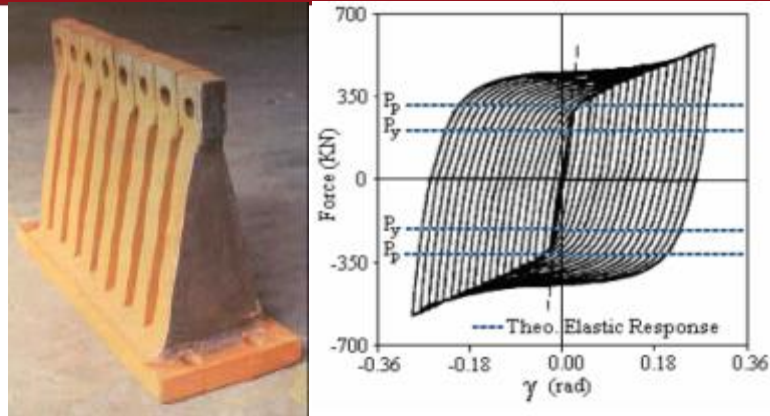


Figura 2.7: Disipador TADAS y comportamiento histerético (Tsai et al., 1993).

Disipadores tipo Honey-Comb.

Un dispositivo hecho de placas de acero mecanizadas conocido como disipador tipo panel propuesto por (Kobori et al., 1992) si comportamiento es similar al ADAS pero con la diferencia que trabaja en su plano y por lo tanto es rígida.

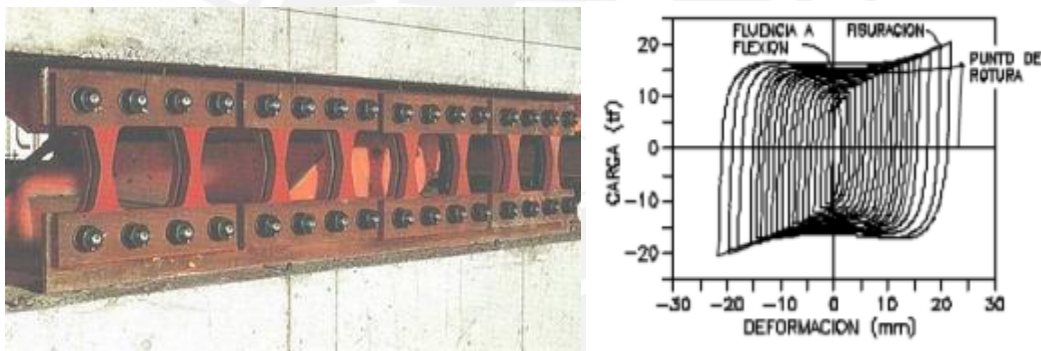


Figura 2.8: Disipador Honey-Comb y comportamiento histerético.

Disipadores de Fricción.

Utilizan el mecanismo de fricción sólida que se desarrolla por el deslizamiento relativo entre si entre dos cuerpos sólidos sometidos a presión, la fuerza de fricción es igual a la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento. Generalmente la curva histerética es de forma rectangular similar a las características de fricción tipo Coulomb. Un sistema típico es el mostrado por (Pall and Marsh, 1982) donde el dispositivo es colocado en un sistema de brazos diagonales (Fig. 2.9), pero también pueden ser colocados entre la parte superior de un muro y a viga. Cuando se produce un desplazamiento lateral en el sistema, la tensión y compresión que se produce en las diagonales generan esfuerzo de deslizamiento en el dispositivo.

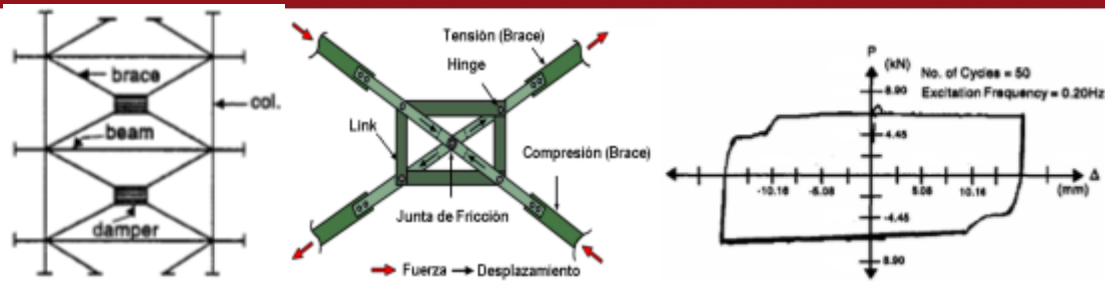


Figura 2.9: Disipador de fricción Pall (Pall and Marsh, 1982).

2.2.1.2 Disipadores dependientes de la velocidad.

Disipadores Viscoelásticos.

Estos dispositivos están basados en materiales visco-elásticos (VE) que son generalmente copolímeros y sustancias vidriosas que tienen gran capacidad de disipación de energía por deformaciones de corte. La disipación de energía se basa en el aumento de amortiguamiento estructural y la fuerza disipadora es proporcional a la velocidad con la característica que no cambian significativamente los periodos de vibración por lo que se pueden linealizar su comportamiento y modelación. El dispositivo consiste en una capa de material VE unido a dos capas de metales, uno de los más conocidos es el disipador 3M que se coloca generalmente como una diagonal en marcos (Fig. 2.10), la primera aplicación de este sistema fue en el World Trade Center-NY en 1969.

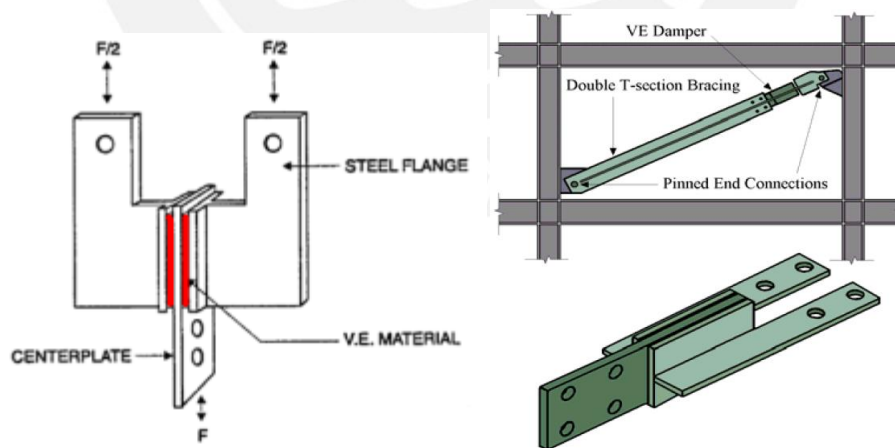


Figura 2.10: Disipador Viscoelástico tipo 3M.

Disipadores de Fluidos Viscosos.

Son similares a los amortiguadores de carro, consiste en un pistón (barra redonda) dentro de una cámara (cilindro) lleno de un líquido compuesto por aceite de silicona (FV) (Constantinou et al., 1993), tal como se muestra en la Fig. 2.11. El pistón tiene pequeños orificios, cuando se mueve dentro del cilindro el líquido es obligado a pasar por los orificios causando fricción, las fuerzas de salida es directamente proporcional a la velocidad del pistón.

Una de sus principales ventajas es que pueden reducir los desplazamientos y los esfuerzos en el mismo tiempo debido a que la fuerza del amortiguador esta fuera de fase con los desplazamientos, para estructuras rígidas no es muy recomendable debido a la gran cantidad que amortiguadores que se pudieran necesitar.

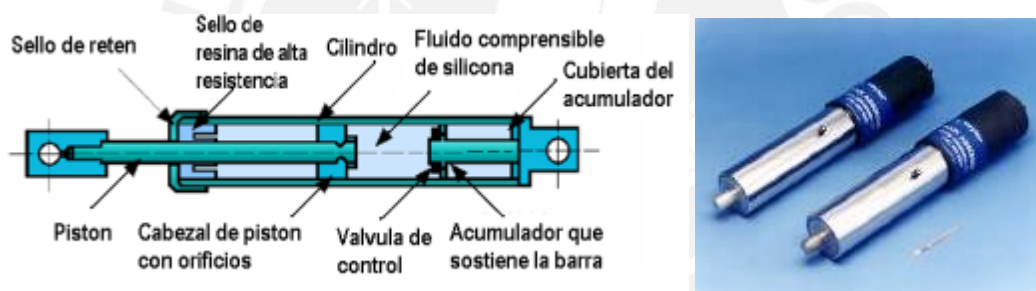


Figura 2.11: Disipadores viscosos: Constantinou y tipo Taylor.



Figura 2.12: Disipadores viscosos en edificios (www.taylordevices.com/seismic-rehabilitation.html.)

CAPÍTULO III

3. DISIPADORES METÁLICOS TIPO ADAS

3.1. Características mecánicas básicas de disipadores ADAS.

Debido a la forma de sus placas X (reloj de arena) de los disipadores tipo ADAS, conducen a una deformación uniforme en toda su sección lo cual le da una excelente resistencia y capacidad de deformación ante cargas cíclicas. Uno de los ensayos más extensos para determinar tanto las propiedades del elemento como el comportamiento dinámico fueron realizados por Alonso (1989) y Whittaker et al. (1989), tal como se muestra en la Fig. 3.1.

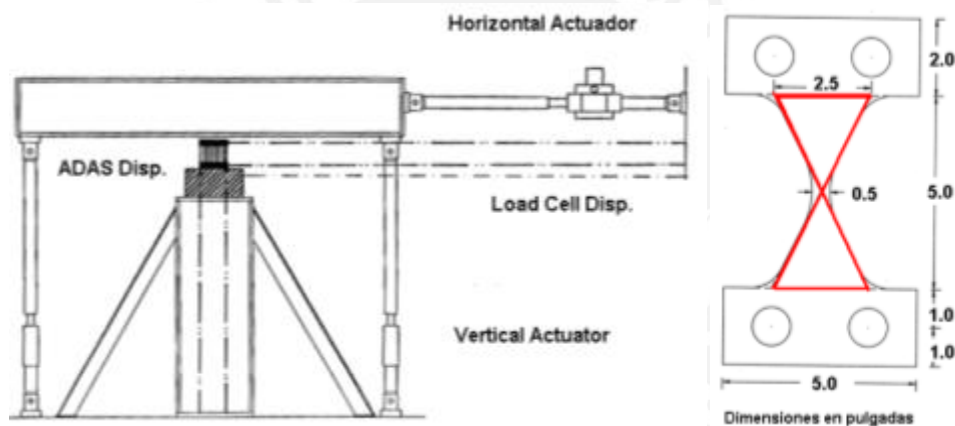


Figura 3.1: Ensayo de carga lateral cíclica de dispositivo ADAS.

Los resultados de los ensayos mostraron un buen comportamiento ante cargas cíclicas soportando grandes deformaciones sin pérdida de resistencia (Fig. 3.3.b). Los disipadores ADAS cuando están en condiciones de empotramiento perfecto y al sufrir un desplazamiento lateral (con secciones simétricas), tal como se muestra en la Fig. 3.2 se deforma en doble curvatura con radios iguales “R” produciendo esfuerzos iguales en cada sección del disipador (esfuerzos en A-A es igual en B-B). La característica de esfuerzos iguales en cada sección es muy importante porque garantiza una plastificación uniforme en toda la longitud del disipador evitando fallas locales.

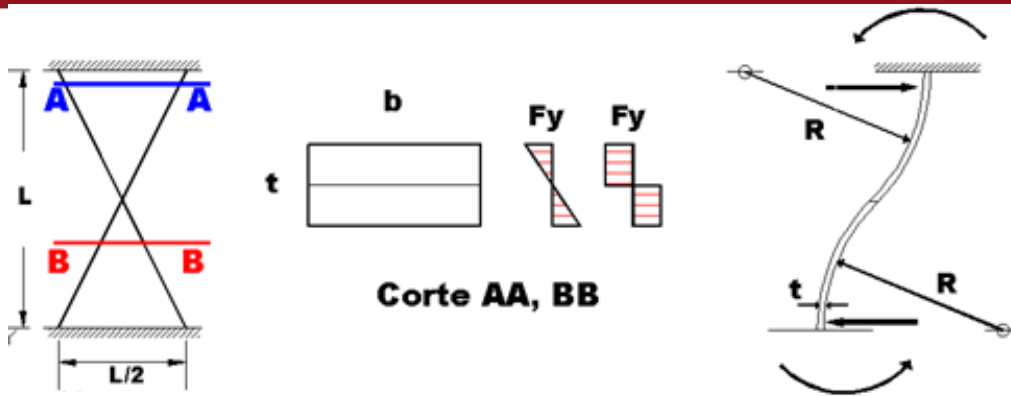


Figura 3.2: Deformación y esfuerzo en disipadores ADAS.

Para poder obtener los valores característicos del disipador, la curva experimental de fuerza-deformación fue idealizada (Alonso, 1989) en donde se definieron los siguientes parámetros: deformación de fluencia y plastificación Δ_y^{Pl} , Δ_y^{ADAS} ; las resistencias elástica y plástica V_y^{Pl} , V_p^{Pl} (fig. 3.3.a).

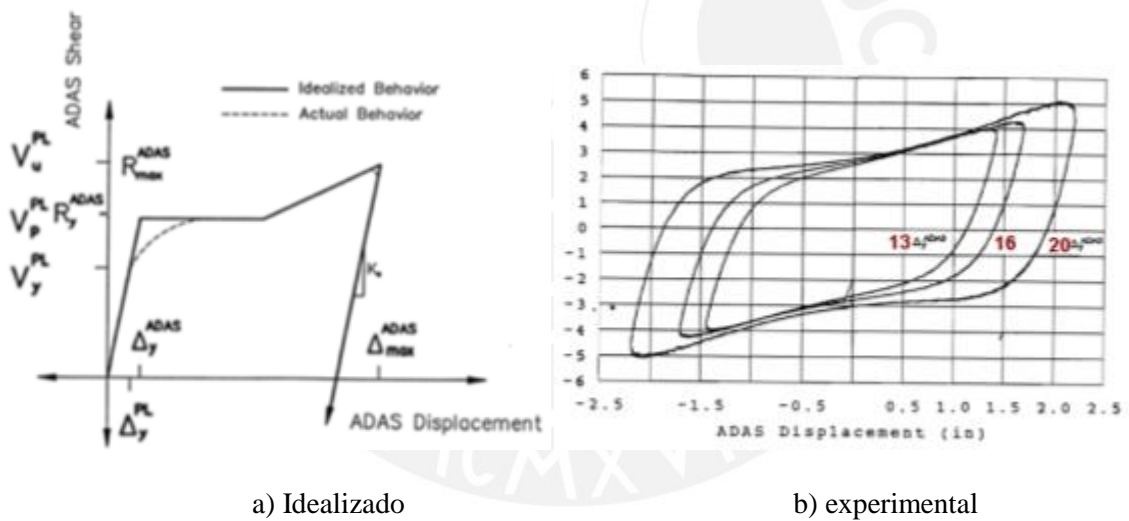


Figura 3.3: Comportamiento fuerza - deformación de dispositivo ADAS (Alonso, 1989).

Para la determinación de los valores característicos la geometría de las placas del disipador se pueden idealizar y simplificar (Fig. 3.4), tal como lo propusieron (Alonso, 1989) y (Whittaker et al., 1989).

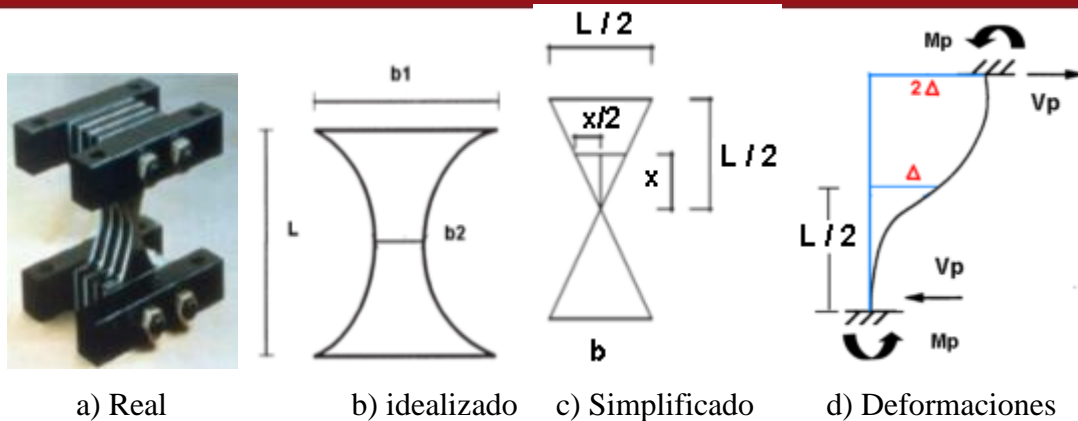


Figura 3.4: Caracterización de la geometría del dissipador ADAS.

La deformación de fluencia y plástica se puede calcular por la integración doble del promedio plástico de la curvatura, siendo $M_{px}(z)$ el momento plástico y $I_x(z)$ el momento de inercia:

$$\Delta_y^{ADAS} = \iint \frac{M_{px}(z) dx dz}{EI_x(z)} \tag{Ec. 3.1}$$

Donde:

$$M_{px}(z) = \sigma_y \cdot Z_x = \frac{\sigma_y \cdot b(z) \cdot t^2}{4}$$

$$I_x(z) = \frac{b(z) \cdot t^3}{12}$$

El desplazamiento de fluencia Δ_y^{ADAS} de acuerdo a lo indicado por (Tena, 1993) es:

$$\Delta_y^{ADAS} = \frac{3 \cdot \sigma_y \cdot l^2}{4 \cdot E \cdot t} \tag{Ec. 3.2}$$

La ecuación (3.2) para el modelo simplificado se puede calcular aprovechando la simetría de la sección para una placa (Fig. 3.4c). La deformación “ Δ ” puede calcularse por diferentes métodos como la viga conjugada o área de momentos, utilizando este último, asumiendo una distribución uniforme de esfuerzos en todas las secciones de las placas del dissipador (Scholl, R, 1988) y tomando el valor de la base como la mitad de la altura (Alonso, 1989).

$$\Delta = \int_0^{L/2} \frac{M_{p,x}}{E \cdot I(x)} \cdot \partial x \tag{Ec. 3.3}$$

Donde:

$$M_p = \frac{\sigma y x t^2}{4} \quad y \quad I(x) = \frac{x t^3}{12}$$

t = es el espesor de placa.

El desplazamiento “Δ” está dado por:

$$\Delta = \frac{3 \cdot \sigma y \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot t}$$

Finalmente se logra la misma expresión que la ecuación (3.2):

$$\Delta_y^{ADAS} = 2\Delta = \frac{3 \cdot \sigma y \cdot l^2}{4 \cdot E \cdot t}$$

La fuerza V_{pi} para cada placa, se calcula a partir del equilibrio de momentos en los extremos (Fig.3.4.d). Para varias placas simplemente se multiplica V_{pi} por el número de placas “n”.

$$V_p = V_p^{PI} = \frac{2 \cdot M_p \cdot n}{l} = \frac{\sigma y \cdot b \cdot t^2 \cdot n}{2 \cdot l} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

De manera similar se puede encontrar la fuerza de fluencia elástica Δ_y^{PI} considerando el momento elástico como:

$$M_e = \sigma_y \cdot S_x = \frac{\sigma y \cdot b \cdot t^2}{6}$$

Aplicando el método de área de momentos se obtiene la deformación elástica.

$$\Delta_y^{PL} = \frac{\sigma y \cdot l^2}{2 \cdot E \cdot t} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

La fuerza de fluencia aplicando el equilibrio resulta:

$$V_y^{PI} = \frac{2 \cdot M_e \cdot n}{l} = \frac{\sigma y \cdot b \cdot t^2 \cdot n}{3 \cdot l} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

3.2. Modelos de comportamiento histerético de disipadores ADAS.

Los modelos histeréticos son ecuaciones que representan en forma aproximada las relaciones de carga y descarga vs desplazamiento de un elemento analizado (fig. 3.3.b). Existen modelos simples y complejos, a continuación se describen los principales.

3.2.1 Modelo de Ramberg-Osgood

Este modelo fue desarrollado por (Ramberg and Osgood, 1943) para representar los ciclos de histéresis materiales dúctiles, logrando representar el efecto de Bauschinger sin pérdida de rigidez. El modelo consiste en una curva esqueleto (Ec. 3.7) y una familia de curvas (Ec. 3.8) y fueron utilizados por primera vez por Jennings (1964).

$$\frac{d}{d_y} = \frac{F}{F_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{F}{F_y} \right|^{n-1} \right) \tag{Ec. 3.7}$$

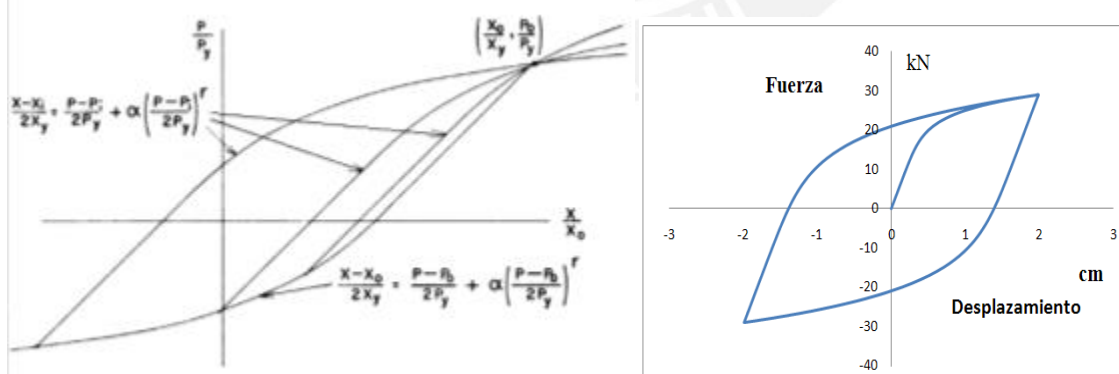
$$\frac{d-d_o}{2d_y} = \frac{F-F_o}{2F_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{F-F_o}{2F_y} \right|^{n-1} \right) \tag{Ec. 3.8}$$

Donde:

F_y : Fuerza de fluencia.

d_y : Desplazamiento de fluencia.

α, n : Coeficientes.



a) Familia de curvas Jennings (1964). b) experimental $F_y= 25\text{kN}$, $d_y=0.5\text{cm}$, $\alpha=1$, $n=7$.

Figura 3.5: Modelo de Ramberg-Osgood.

Para la modelación de dispositivos ADAS con el modelo de Ramberg-Osgood, se obtuvieron valores de $\alpha=1$ y $n=7$ (Sun and Hanson, 1990).

3.2.2 Modelo de Bouc-wen

Se compone de una fuerza restauradora (cuya variable es el desplazamiento) y z (variable a dimensional).

$$f_r = \alpha k_1 x + (1 - \alpha) f_y z \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \gamma \dot{x} |z|^n \quad (\text{Ec. 3.10})$$

A =factor de escala general.

α =Razón de proporcionalidad entre fuerza lineal/fuerza no lineal.

β, γ =coeficientes de ajuste de la curva.

N =coeficiente que regula la suavidad de transición entre la región lineal y no lineal.

La ecuación diferencial que gobierna el movimiento para sistema de un grado de libertad (SDOF) dada por (Dobson et al., 1997) es.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \gamma\omega^2 x + (1 - \gamma)\omega^2 z = u(t) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

El modelo de Bouc-wen puede representar distintos tipos de curvas constitutivas y por lo tanto gran variedad de dispositivos (Dobson et al., 1997) Fig. 3.6.

La dificultad de este modelo es tener una ecuación diferencial lo cual requiere métodos numéricos como el de Runge-Kutte, este modelo es muy potente y adecuado para el comportamiento de diferentes disipadores metálicos.

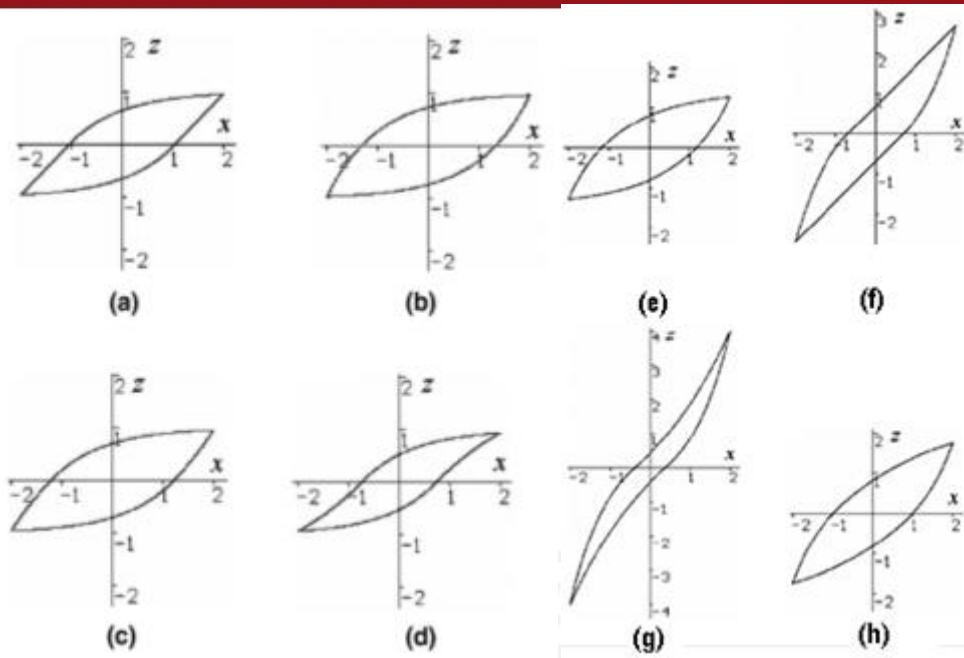


Figura 3.6: Lazos de histéresis generados por modelo Bouc–Wen. (a) $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$; (b) $\alpha = 1.0$, $\beta = 0.0$; (c) $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$; (d) $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$; (e) $\alpha = 0.85$, $\beta = -0.15$; (f) $\alpha = 0.5$, $\beta = -0.5$; (g) $\alpha = 0.3$, $\beta = -0.7$; (h) $\alpha = 0.7$, $\beta = -0.3$. (Dobson et al., 1997).

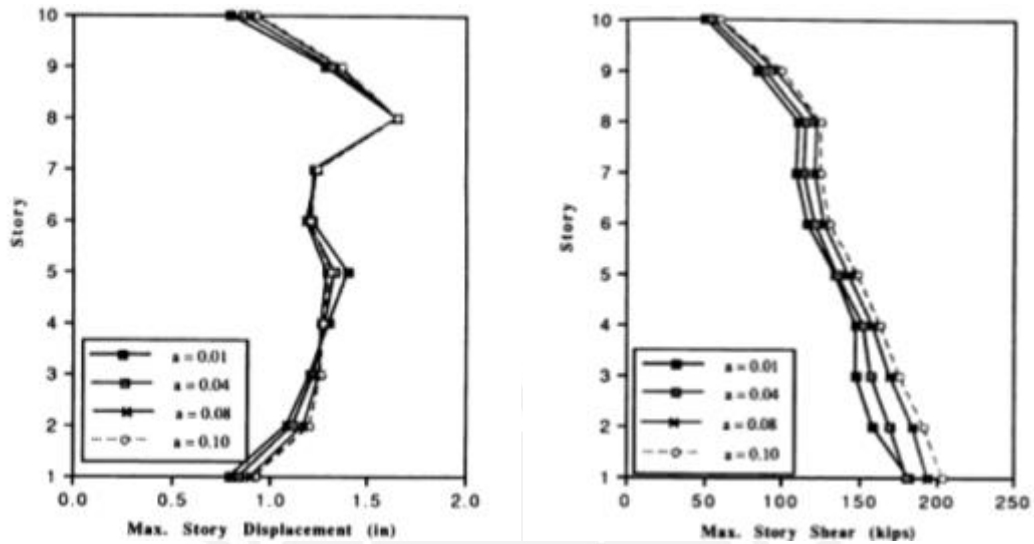
3.2.3 Modelo Bilineal

Es un modelo sencillo, consta de dos rigideces K_h , K_b (Fig. 3.8a) este modelo representa muy bien el comportamiento cíclico de materiales dúctiles (acero, cobre principalmente) pero en zonas de transición (encuentro de K_d y K_b) aproxima a relaciones lineales cuando debería ser curvas.

Para determinar las características del modelo se necesita conocer los valores de fuerza, deformación de fluencia; deformación máxima y K_h . La fuerza de fluencia es $V_p = V_p^{PI}$, la deformación de fluencia es Δ_y^{ADAS} que fueron expuestos en la sección 3.1.

La deformación máxima Δ_{max} se puede tomar como $14 \Delta_y^{ADAS}$ y K_h (hardening) igual a $0.075K_d$ a partir de $6 \Delta_y^{ADAS}$ según (Whittaker et al., 1989), (Su and Hanson, 1990) demostró que el valor de K_h no afecta significativamente la respuesta inelástica.

(Xia C. at el., (1990) analizo dos pórticos de acero de 10 niveles de tramo simple donde denomino $a=K_h/K_d$, demostró que los desplazamientos y fuerzas tienen poca variación para valores de “a” de 0.01 hasta 0.10

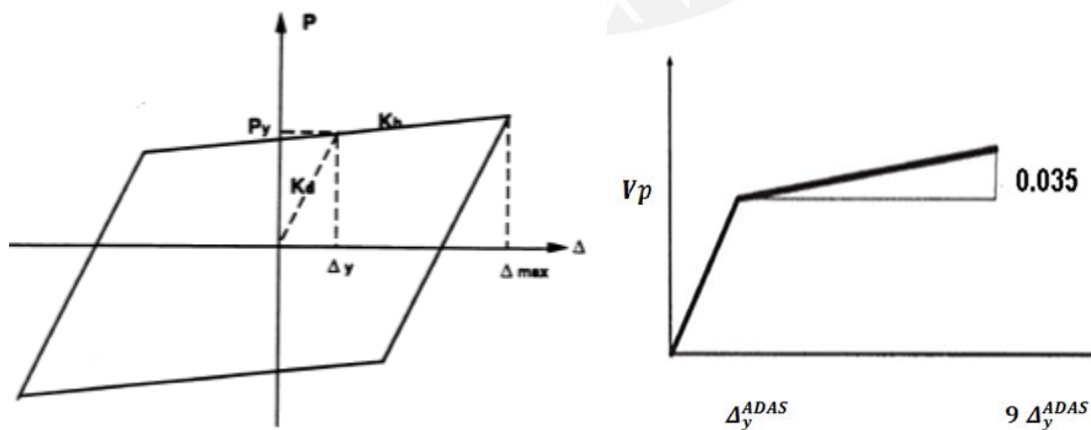


a) Desplazamientos por nivel.

b) Fuerzas por nivel.

Figura 3.7: Variación de K_h (“a”) según Xia C. at el. (1990).

Para el modelo bilineal, en la presente investigación se tomara como deformación máxima igual a $9 \Delta_y^{ADAS}$ y $K_h=0.035K_d$ (Fig. 3.8b), estos valores fueron comprobados en el ejemplo de (Whittaker et al., 1989) obteniéndose valores similares a los experimentales (ver sección 4.7).



a) Idealizado.

b) Utilizado para la investigación.

Figura 3.8: Modelo Bilineal para dispositivos ADAS

3.3 Factores de influencia en el comportamiento de disipadores ADAS.

En la respuesta de estructuras (tipo pórticos) con disipadores ADAS se han encontrado cuatro parámetros importantes que se debe de tener en cuenta para lograr un eficiente y correcto comportamiento del sistema.

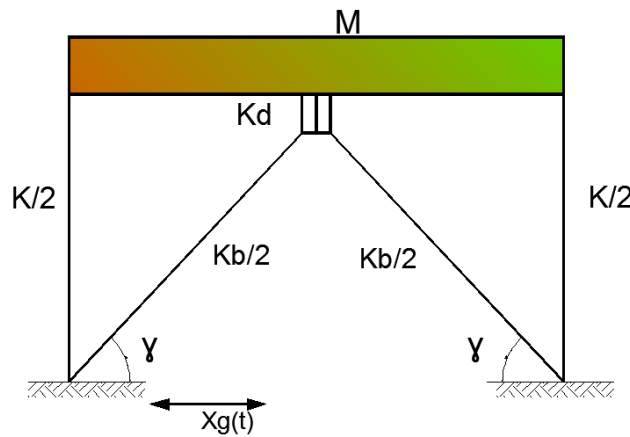


Figura 3.9: Sistema pórtico simple y disipador ADAS

3.3.1 Soporte de los disipadores ADAS

La estructura donde se soportan los dispositivos ADAS debe permanecer elásticamente tanto en compresión (evitar el pandeo) y en tracción, generalmente se utiliza el sistema Chevron. Las fuerzas para cada barra serán:

$$\begin{pmatrix} F1_x \\ F1_y \end{pmatrix} = K \begin{bmatrix} (\cos \gamma)^2 & \cos \gamma \sin \gamma \\ \cos \gamma \sin \gamma & (\sin \gamma)^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\begin{pmatrix} F2_x \\ F2_y \end{pmatrix} = K \begin{bmatrix} (\cos \gamma)^2 & -\cos \gamma \sin \gamma \\ -\cos \gamma \sin \gamma & (\sin \gamma)^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

γ : Angulo del soporte con la columna vertical.

K : EI/A rigidez de una barra simple.

La fuerza horizontal total F_x está dada por la suma de F_{1x} más F_{2x} .

$$F_x = 2 \delta_x K (\cos \gamma)^2 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

La rigidez horizontal está dada por:

$$K_b = \frac{F_x}{\delta_x} = \frac{2EA(\cos \gamma)^2}{L} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Para que los elementos de los soportes tengan una adecuada resistencia, (Su and Hanson, 1990) recomienda que la resistencia en fluencia de los soportes debe ser igual a dos veces el valor de la fuerza del dissipador ($F_x = 2V_p$). Asumiendo que el esfuerzo de fluencia en el soporte es σ_y , entonces la resistencia horizontal de los soportes es:

$$F_{xy} = 2(\sigma_y A \cos \gamma) \quad (\text{Ec. 3.16})$$

El área mínima será:

$$A_{\min} = \frac{V_p}{\sigma_y \cos \gamma} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Finalmente la rigidez mínima del soporte será:

$$K_{b\min} = \frac{2V_p E \cos \gamma}{\sigma_y L} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

3.3.2 Rigidez elástica del elemento ADAS

La rigidez en conjunto (K_a) del soporte (K_b) y del dispositivo ADAS (K_d) están en serie y su valor es:

$$K_a = \frac{K_b K_d}{K_b + K_d} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

La relación de K_b/K_d denominada B/D, reescribiendo la ecuación anterior.

$$K_a = \phi K_d$$

Donde:

(Ec. 3.20)

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{1}{B/D}}$$

El factor Φ se incrementa rápidamente para relaciones $B/D = 5$, lo cual indica que no es eficiente ni económico tener relaciones mayores a 5, además cuando el disipador entra al rango no lineal esta relación se incrementa mucho más.

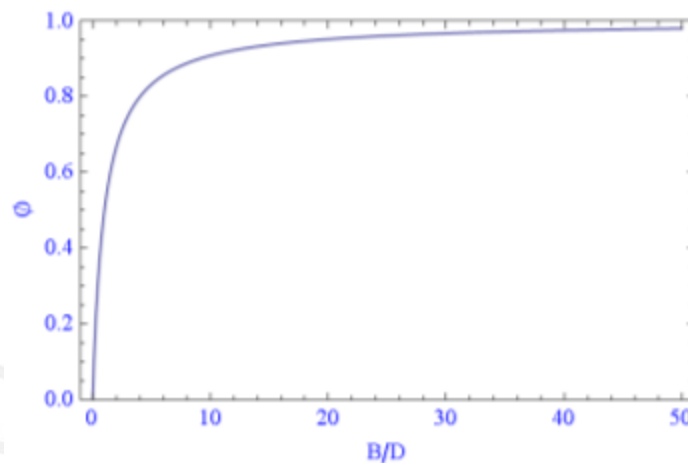


Figura 3.10: Relación de Φ - B/D.

(Xia C. at el., 1990) recomienda una relación de $B/D=2$, además observó que esta relación tiene poca influencia en la respuesta no lineal de sistemas apórticados (Fig. 3.11) donde ERSF de 1 y 2 son el factor de escala para la señal del Centro 1943.

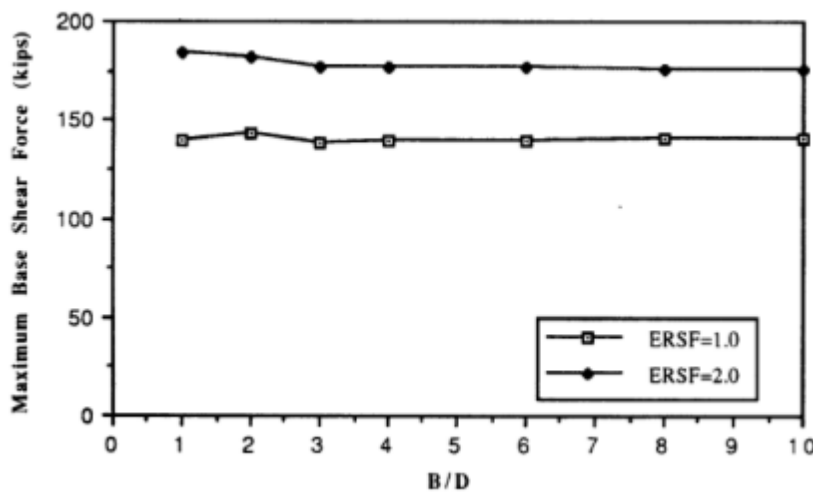


Figura 3.11: Relación de fuerza - B/D, para pórtico de 10 niveles con $SR=2$.

3.3.3 Relación SR

Se define relación $SR=K_a/K_s$, donde K_s es la rigidez del pórtico sin el disipador, (Xia C. at el., 1990) verifico que valores de $SR = 1, 2,3$ reducen los desplazamientos laterales (Fig. 3.12) pero de acuerdo a las características de cada sismo y aumentan los valores de fuerzas cortantes de entrepiso (Fig. 3.13) donde Δ_y es la fluencia del disipador.

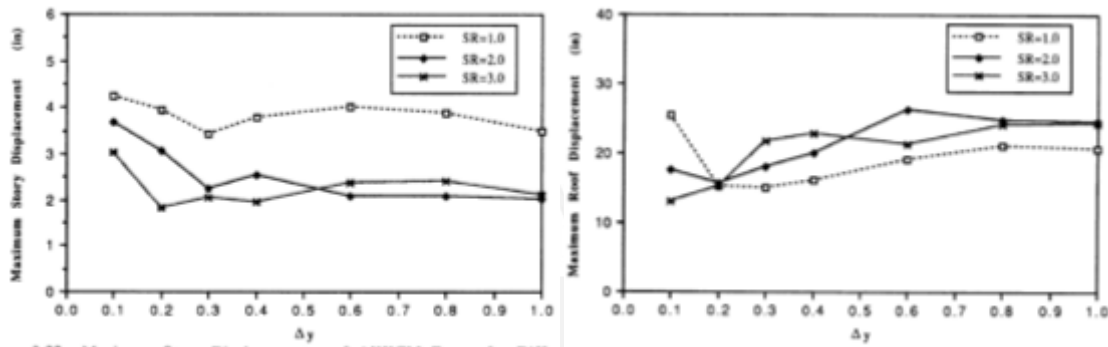


Figura 3.12: Desplazamientos máximos - Δ_y , para pórtico de 10 niveles.

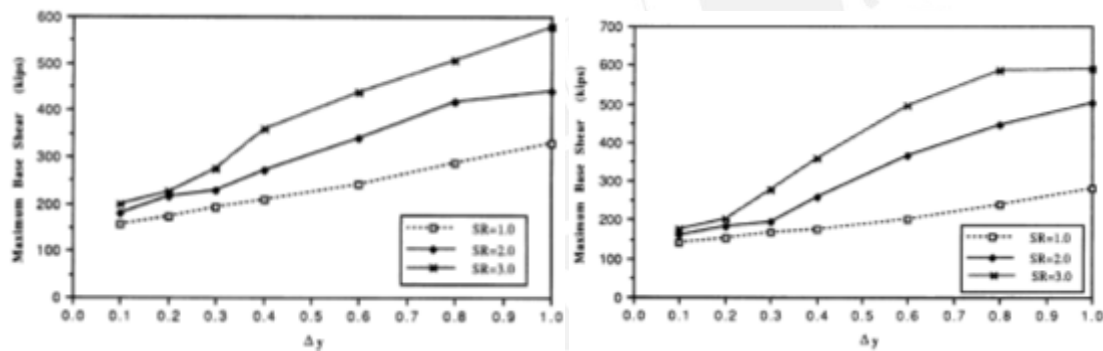


Figura 3.13: Relación de fuerza en la base - Δ_y , para pórtico de 10 niveles.

Se recomienda valores de **SR entre 2 y 3** para tener una buena capacidad de reducción de desplazamientos, pero también recordar que influye mucho las características del sismo.

3.3.4 Amortiguamiento viscoso equivalente

El amortiguamiento viscoso equivalente por definición (Chopra, 1995) es:

$$\beta = \frac{W_D}{4 \pi W_S} \tag{Ec. 3.21}$$

Donde W_D es la energía histerética disipada, igual al área bajo la curva de histéresis para un ciclo; para el modelo bilineal (Fig. 3.8a) está dada por.

$$W_D = 4P_y \Delta_y (\Delta_{\max} - \Delta_y) \tag{Ec. 3.22}$$

La energía de deformación W_S es:

$$W_S = \frac{1}{2} (K_s \Delta_{\max} + K_S \Delta_y) \tag{Ec.3.23}$$

$$\beta = \frac{\frac{2P_y}{F_e} \left(1 - \frac{P_y K_a}{F_e K_S} \right)}{\pi \left(1 + \frac{P_y}{F_e} \right)} \tag{Ec.3.24}$$

Sabiendo que $SR = K_a / K_s$, donde F_e es la fuerza elástica en la estructura (sin el disipador) una gráfica de β en función de SR y P_y / F_e Fig. 3.14 adaptado de (Kelly, 2001) se puede observar que para un $SR = 2$ el amortiguamiento es aproximadamente de 15% y vemos que en casos imprácticos llegara al 35% a 50% donde la fuerza del disipador (P_y) es mucho mayor a la de la estructura (F_e) Fig. 3.15.

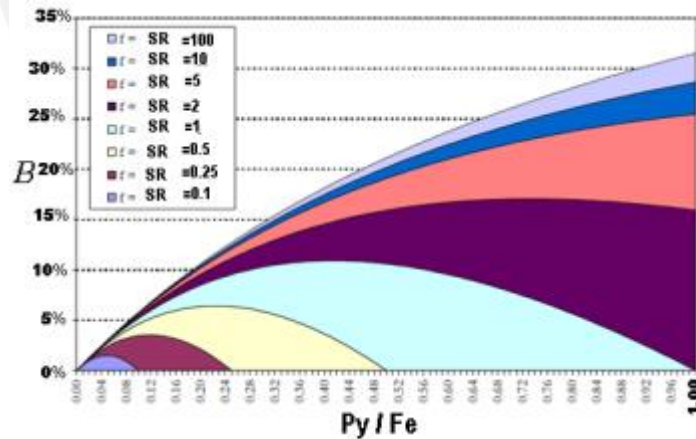


Figura 3.14: β como función de propiedades de pórtico estructural. (Kelly, 2001).

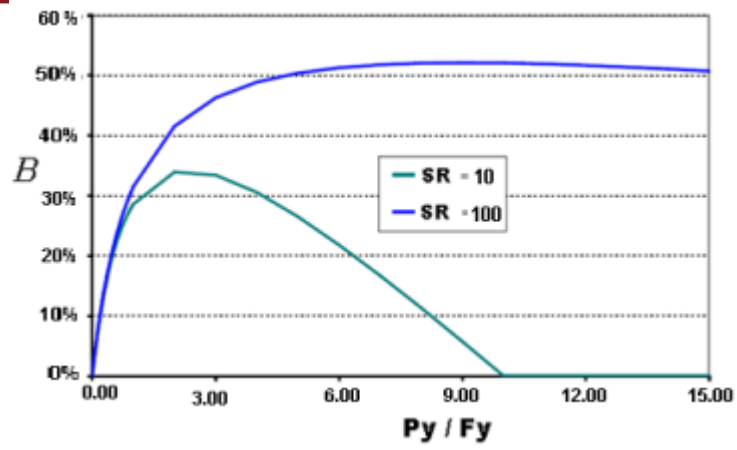


Figura 3.15: β como función de propiedades de disipador muy rígido. (Kelly, 2001).



CAPÍTULO IV

4. MODELAMIENTO NO LINEAL DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Para el modelamiento no lineal se utilizó el programa PERFORM 3D (CSI, 2011) que es especializado en realizar análisis no lineal tridimensional donde estructuras y modelos complejos se pueden analizar de forma no lineal usando una gran variedad de estados límites de deformación y resistencias.

4.1 Relación de fuerza-deformación bajo cargas cíclicas.

Cuando una viga, columna o muro es sometido a cargas cíclicas (carga y descarga) la relación fuerza-deformación deja de ser lineal y toma la forma de curvas entrelazadas que son llamadas curvas de histéresis Fig. 4.1. Las curvas de histéresis pueden darse para distintas relaciones, las principales son: fuerza-desplazamiento, momento-desplazamiento.

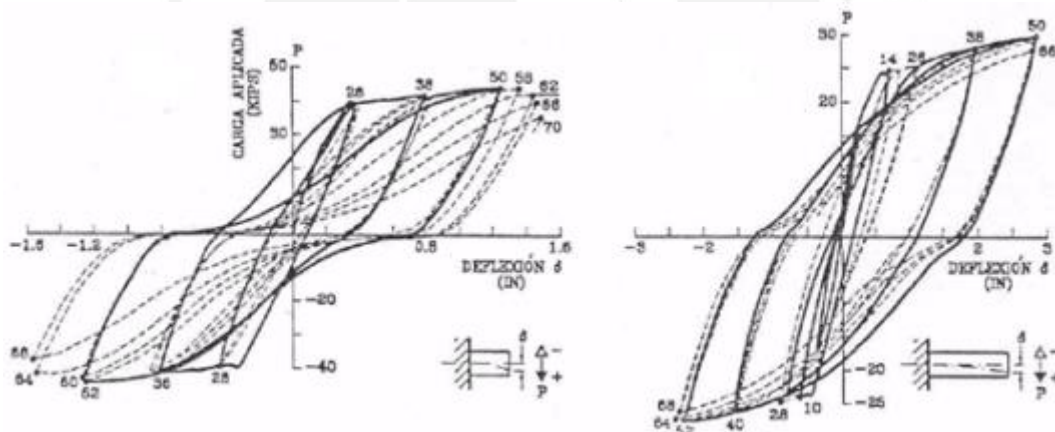


Figura 4.1: Relaciones de esfuerzo-deformación para vigas (ACI 318,1989).

Las curvas de histéresis dependen de muchos factores tales como agrietamiento y comportamiento no lineal del concreto, cantidad de refuerzo de acero, velocidad de la carga entre otros. En la actualidad existen muchos modelos que representan las curvas de histéresis desde simples hasta complejos Fig. 4.2.

El modelo más simple de comportamiento histerético es el bilineal que fue propuesto por Veletsos y Newmark en 1960 Fig. 4.2a, este modelo no presenta la degradación de la resistencia y no es recomendable para secciones de concreto armado.

El modelo de Clough Fig. 4.2b propuesto en 1965 ya incorpora degradación de rigidez y ha sido utilizado en las primeras investigaciones de análisis no lineales. Un modelo más sofisticado y desarrollado en base a ensayos fue propuesto por (Takeda et al, 1970) Fig. 4.2c, incluye cambios en la rigidez, agrietamiento por flexión, fluencia y deformación por endurecimiento.

El modelo de Takeda considera comportamiento por flexión y asume que no habrá falla predominante por cortante y adherencia. El modelo hysterético de Park (Park et al., 1987) Fig. 4.2d, es uno de los más completos ya considera además del modelo de Takeda la degradación de resistencia, efectos de “pinching” pudiendo modelar muros estructurales.

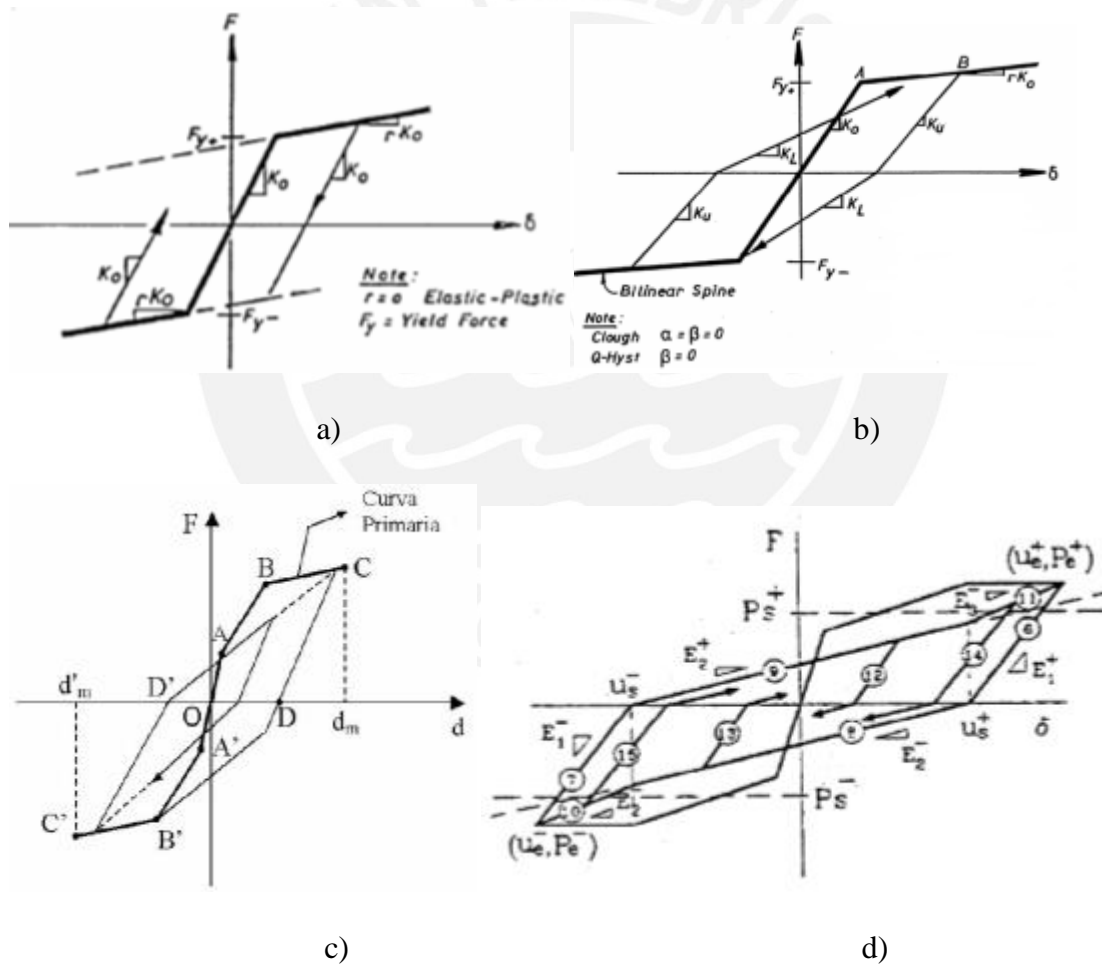


Figura 4.2: Modelos hystereticos para elementos de concreto armado.

En la Fig. 4.2 se puede observar que todos los modelos tienen un borde definido (puntos A, B, C) o están formados por líneas de borde (modelo d), a este borde se le denomina la curva envolvente “blackbone curve” Fig. 4.3a (Ghodrati Amiri et al., 2009).

La “backbone curve” es una relación simplificada entre fuerza y desplazamiento que sirve para caracterizar y analizar modelos no lineales.

En la realización de análisis no lineal se ha estandarizado la forma o relación de la “backbone curve” Fig. 4.3b, el documento (FEMA 356, 2000) y (ASCE-41, 2006) proveen una relación estándar (Fig. 4.4a).

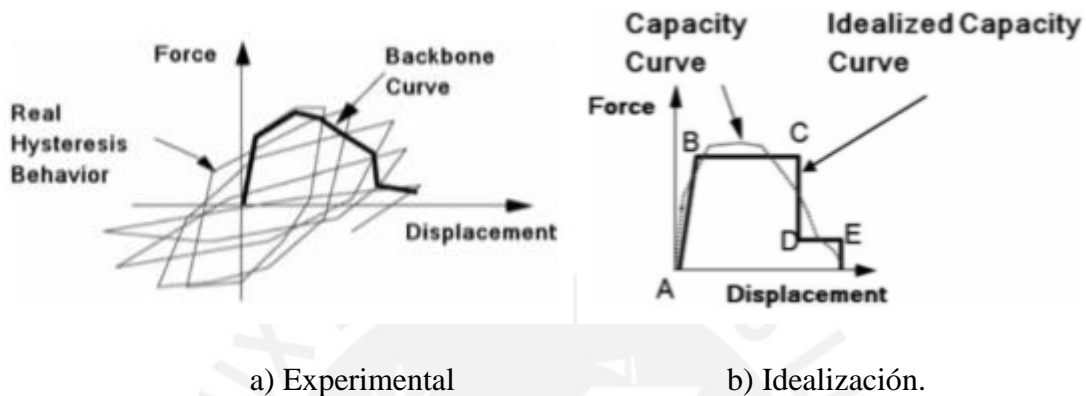
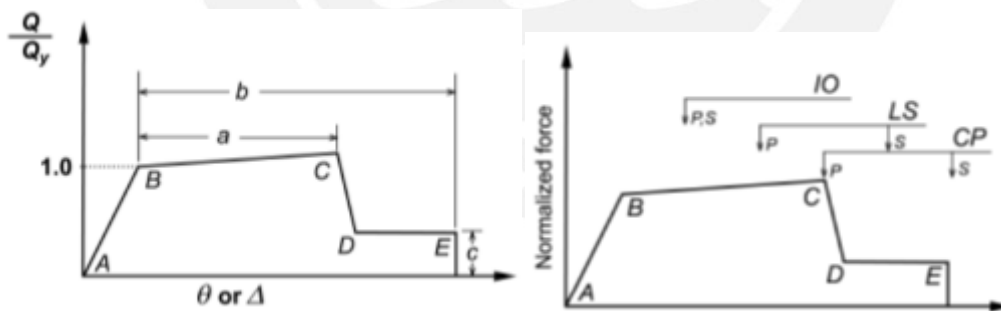


Figura 4.3: Curva backbone (Ghodrati Amiri et al., 2009).

El punto B indica el límite del comportamiento elástico, el punto C representa el desplazamiento máximo con un aumento de la fuerza; el punto D fija la pérdida de resistencia y finalmente el punto E es el desplazamiento máximo.



a) Fuerza-desplazamiento b) deformaciones en elementos principales (P) y secundarios (S)

Figura 4.4: Idealización de curva backbone (FEMA 356,2000)

La Fig. 4.4 está basada en una envolvente con cargas monotónicas que difiere para cargas cíclicas, pero ASCE-41 acepta su uso en análisis no lineales por contener los puntos representativos (A, B, C, D) que también se presentan en una envolvente con cargas cíclica, además se debe usar un modelo histerético para representar la degradación cíclica de la rigidez.

PERFORM 3D tiene su relación de fuerza-desplazamiento Fig. 4.5 de forma similar al propuesto por FEMA 356, donde la pérdida de resistencia es opcional.

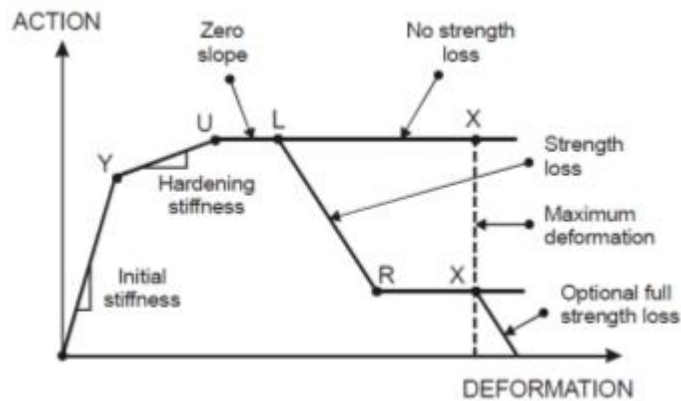


Figura 4.5: Relación de fuerza-deformación en PERFROM 3D.

La “blackbone curve” y los modelos presentados en la Fig. 4.2 están relacionados con las propiedades no lineales concentradas en un solo lugar (punto) conocida como plasticidad concentrada. Para elementos de concreto armado sometidos a movimientos sísmicos el comportamiento inelástico se encuentra mayormente en los extremos de vigas o columnas denominándose rotula plástica “Hinge” Fig. 4.6 (Otani, 1980), esto es una simplificación que brinda resultados confiables.

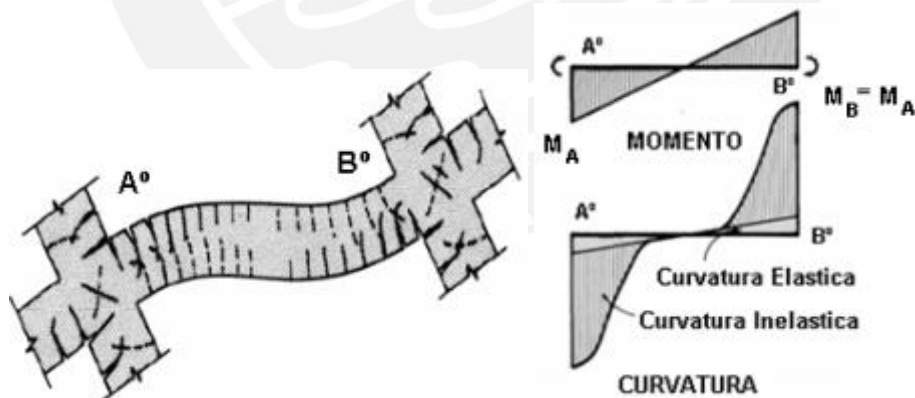


Figura 4.6: Plasticidad concentrada para elemento viga (Otani, 1980).

En el presente trabajo solo se considerara hasta el punto C, siguiendo las recomendaciones de FEMA 356 que indica que para elementos principales solo se debe aceptar hasta el punto C Fig. 4.4b, si se considerar el punto E, el elemento ha perdido casi toda su resistencia sufriendo deformaciones de colapso lo cual no está permitido.

4.2 Modelos no lineales

Los programas que realizan análisis no lineal generalmente definen modelos de componentes no lineales Fig. 4.7 para elementos viga y columna. Los modelos se basan en concentrar y distribuir la plasticidad, los más sofisticados (fibra y elementos finitos) se recomienda su uso en modelos refinados o para modelar ensayos reales que necesitan ser calibrados. Los modelos de plasticidad concentrada son usados en análisis de estructuras convencionales debido a su eficiencia y simplicidad.

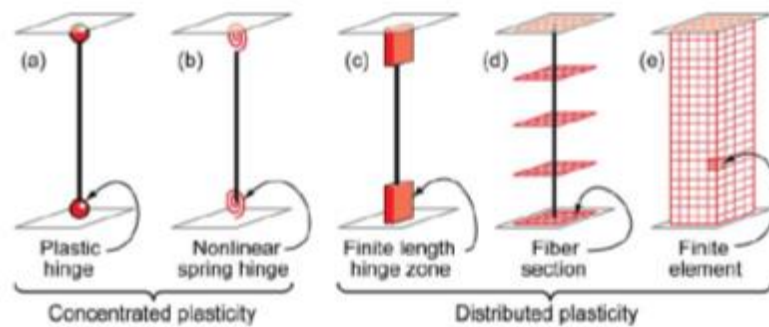


Figura 4.7: Modelos idealizados para elementos viga-columna (NEHRP, 2010).

PERFORM 3D posee diferentes tipos de modelos como en la Fig. 4.7, para el presente trabajo se utilizara el modelo de plasticidad concentrada definido “Chord rotation” que está basado en las recomendaciones dadas por FEMA 356. El modelo de “Chord rotation” se compone de una zona elástica en el centro y rotulas plásticas en los extremos Fig. 4.8.

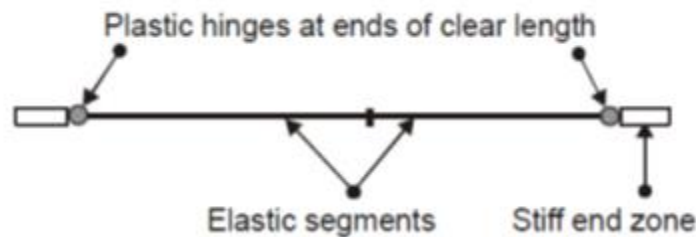


Figura 4.8 modelo Chord rotation en PERFORM 3D.

Para la modelación de viga y columna se hará con elementos “FEMA Beam” y “FEMA Column” (Fig. 4.9), PERFORM 3D los tiene predefinidos (para concreto y acero) que están basados en el modelo “Chord rotation” (Fig. 4.8) y sus características principales se mostraran en la siguiente sección.

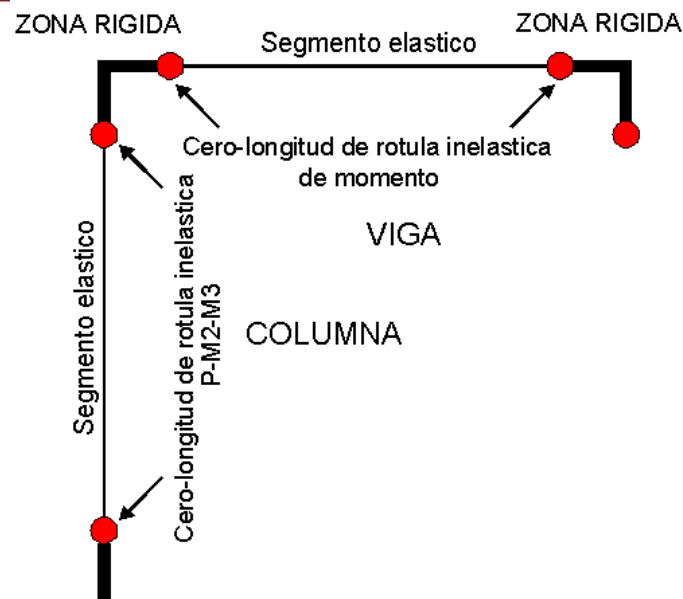


Figura 4.9 elementos FEMA viga y columna en PERFORM 3D.

4.3 Modelamiento de vigas.

En el presente trabajo se utilizó el componente denominado “FEMA Beam, Concrete Type” que PERFORM 3D lo tiene predeterminado que está basado en las recomendaciones dadas por FEMA 356. “FEMA beam, Concrete Type” se basa en la relación momento-rotación para la “blackbone curve”, con una pendiente elástica de $6EI/L$, donde L es la longitud de la viga, se utilizara relación trilineal Fig. 4.10.

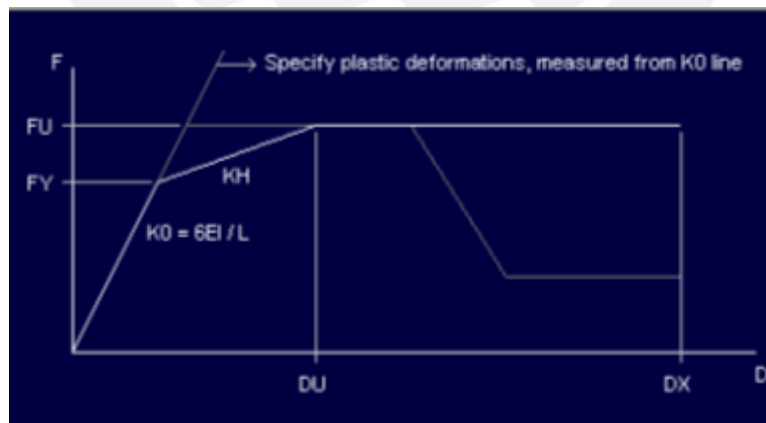


Figura 4.10 relación fuerza-desplazamiento en elemento FEMA beam, Concrete Type”.

Para calcular la relación momento rotación se puede utilizar la Tabla 6-7 (FEMA 356 o ASCE-41-06), otra forma es calcular el diagrama momento-curvatura, para esto se utiliza modelos matemáticos para los materiales y son los siguientes:

- Para el acero el modelo de Mander (Mander, 1984) Fig. 4.11.

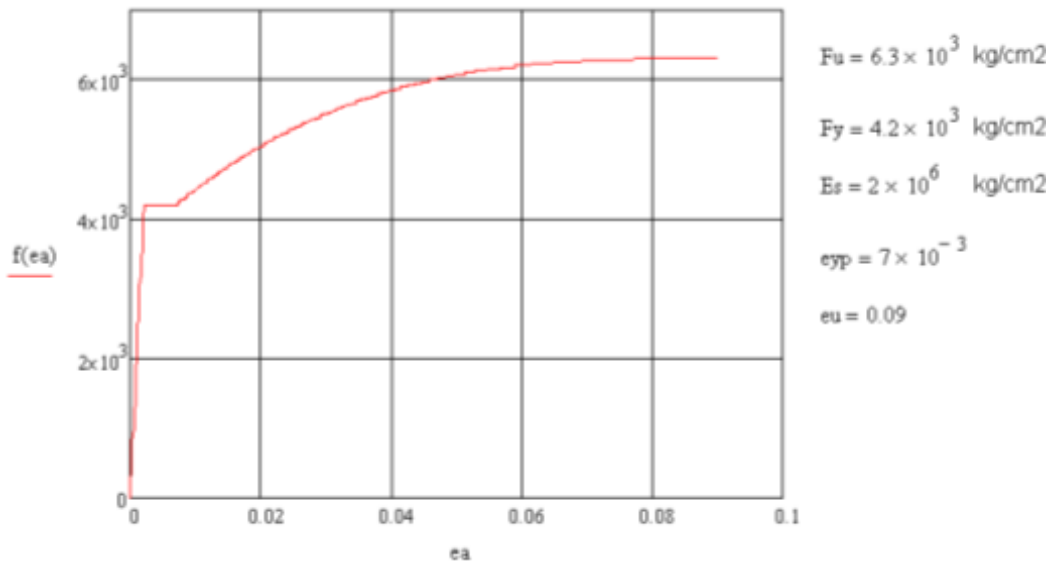


Figura 4.11: Relación fuerza-desplazamiento para acero estructural (Mander, 1984).

- Para el concreto el modelo modificado de (Park et al., 1982) Fig. 4.12.

Con estas consideraciones se obtiene el diagrama momento curvatura Fig. 4.13 (Ver Anexo A).

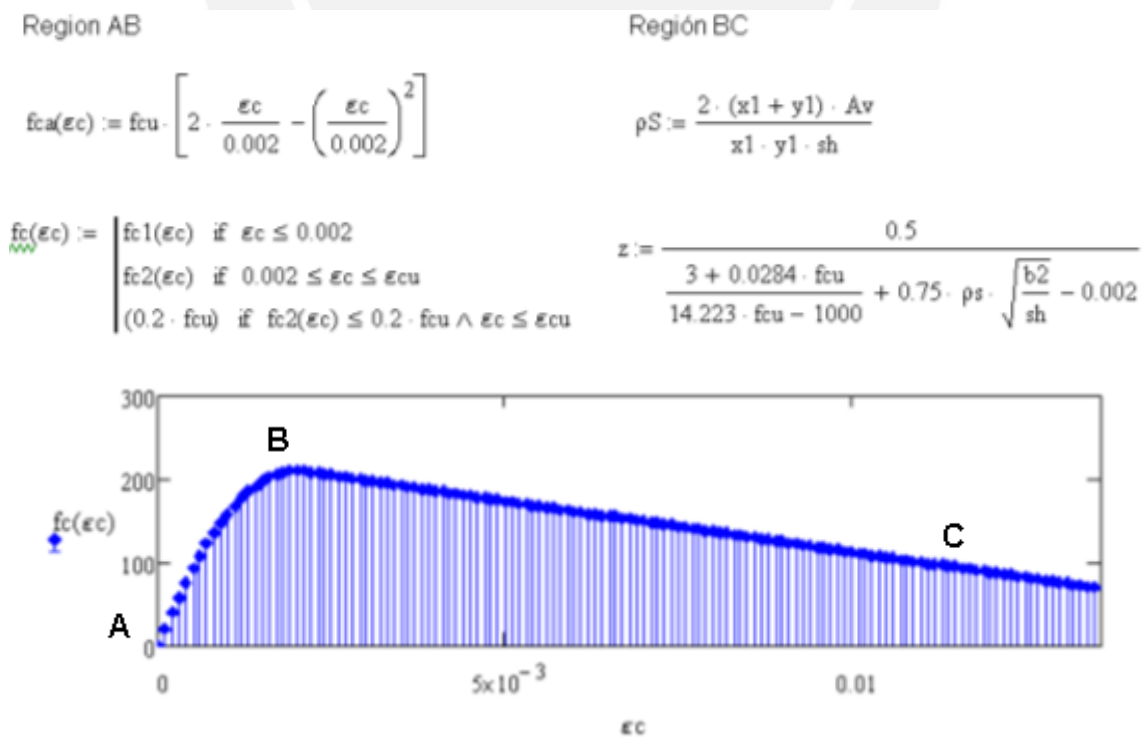


Figura 4.12 modelo de concreto confinado (Park et al., 1982).

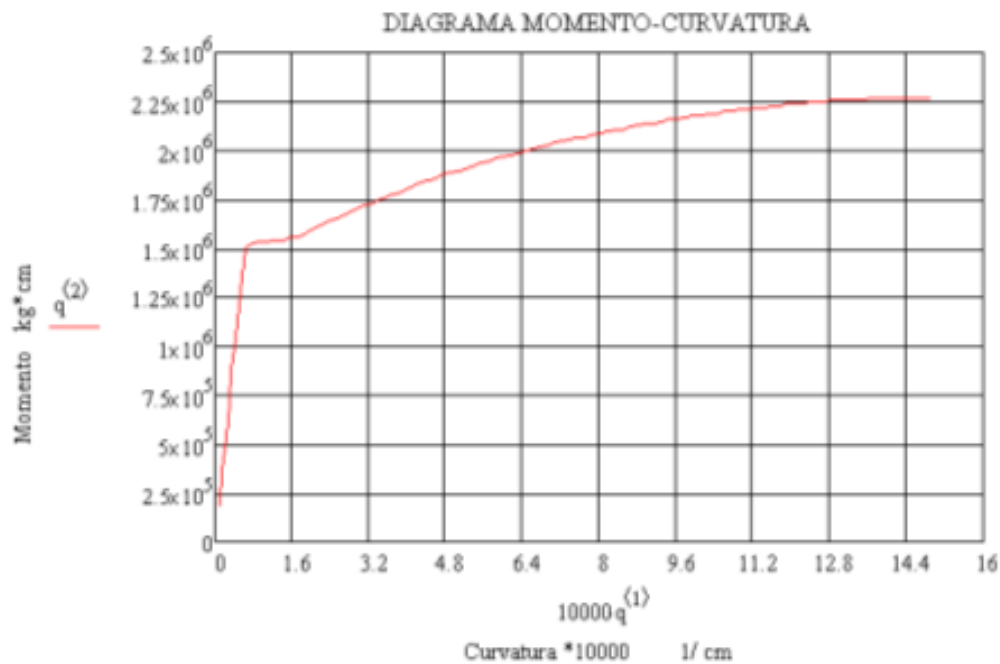


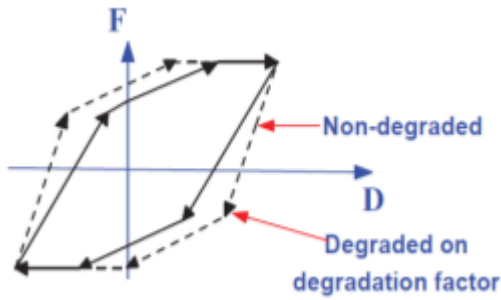
Figura 4.13: Relación momento-curvatura para una sección rectangular.

Luego se convierte el diagrama momento-curvatura a momento-rotación multiplicando la curvatura por **0.5D** según PERFORM 3D “Components and Elements”, donde “D” es el peralte de la columna o viga.

Finalmente se necesita modelar la degradación histerética de la rigidez (lazos de histéresis), PERFORM 3D utiliza el factor de degradación de energía cíclica denominado “e”, que se define como la relación entre el área degradada por un ciclo histerético y el área perteneciente a un ciclo histerético perfectamente elastoplásticos (no degradada) Fig. 4.14. El coeficiente “e” es obtenido calibrando valores que son comprobadas experimentalmente, para el presente trabajo se utilizara el valor de “e=0.2” que representa al modelo de Takeda Fig. 4.15, que fue comprobado experimentalmente por (Hooper, 2009).

En las vigas, adicionalmente del factor “e”, el programa requiere ingresar factores de energía, (Naish, 2010) realizó una serie de ensayos de vigas y posterior calibración con PERFORM 3D obteniendo dichos factores (Tabla 4.1), eligiéndose el modelo tipo “frame beam” (comportamiento por flexión).

Tabla 4.1: Parámetros de degradación cíclico de vigas para $l_n/h=4.0$ en Perform 3D (Naish, 2010).



Model	Energy Factor				
	Y	U	L	R	X
M_n -hinge	0.50	0.45	0.40	0.35	0.35
V_n -hinge	0.50	0.45	0.40	0.35	0.35
Frame beam	0.50	0.40	0.35	0.17	0.17

Figura 4.14: Degradación cíclica.

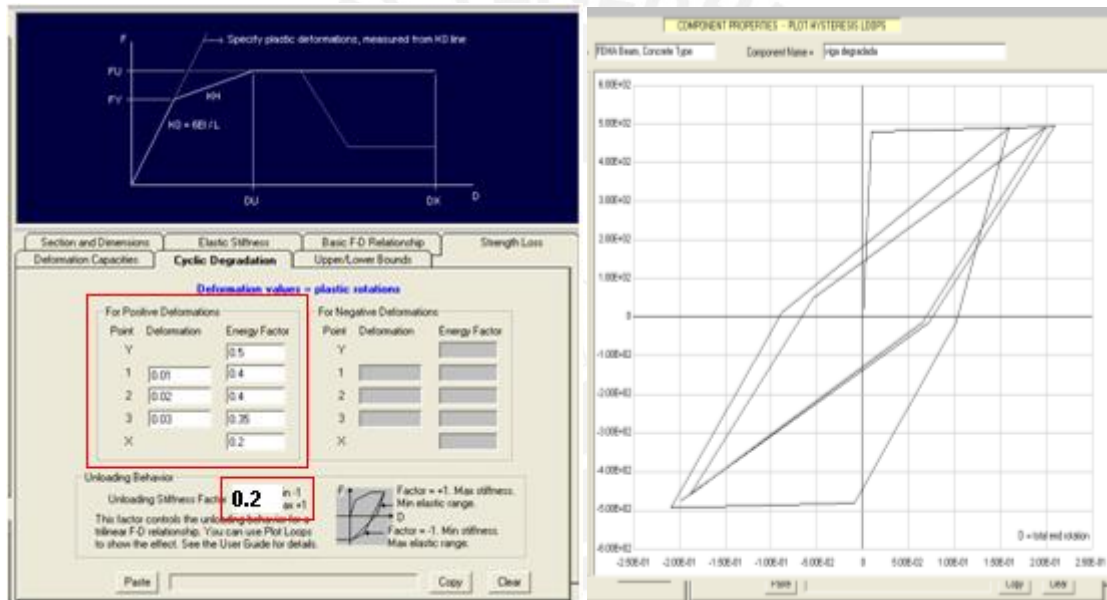


Figura 4.15: Factores de energía y modelo de Takeda en “FEMA beam, Concrete Type” PERFORM 3D.

En el anexo A, se muestra un ejemplo de modelación de vigas en PERFORM 3D.

4.4 Modelamiento de columnas.

Se utilizara el modelo “FEMA Column, Concrete Type” que PERFORM 3D lo tiene predeterminado con características similares a las vigas, se utilizara un modelo bilineal plástico debido a que la estructura tiene muros de concreto y por lo tanto la columna no está sometido a grandes deformaciones. En el modelo bilineal se necesita conocer la rotación plástica última, se empleara la siguiente formula dada por el FEMA P695 (2009) que es más realista a los valores dados en el ASCE-41.

$$\theta_{cap,pl} = 0.12 \cdot (1 + 0.55 \cdot \alpha_{sl}) \cdot 0.16 \frac{P}{A_g f'_c} \cdot (0.02 + 40 \cdot \rho_{sh})^{0.43} \cdot (0.54)^{0.01 \cdot f'_c} \cdot 0.66^{0.1 \cdot s_n} \cdot 2.27^{10 \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 4. 1})$$

Donde:

$P / (A_g f'_c)$: relación de carga axial.

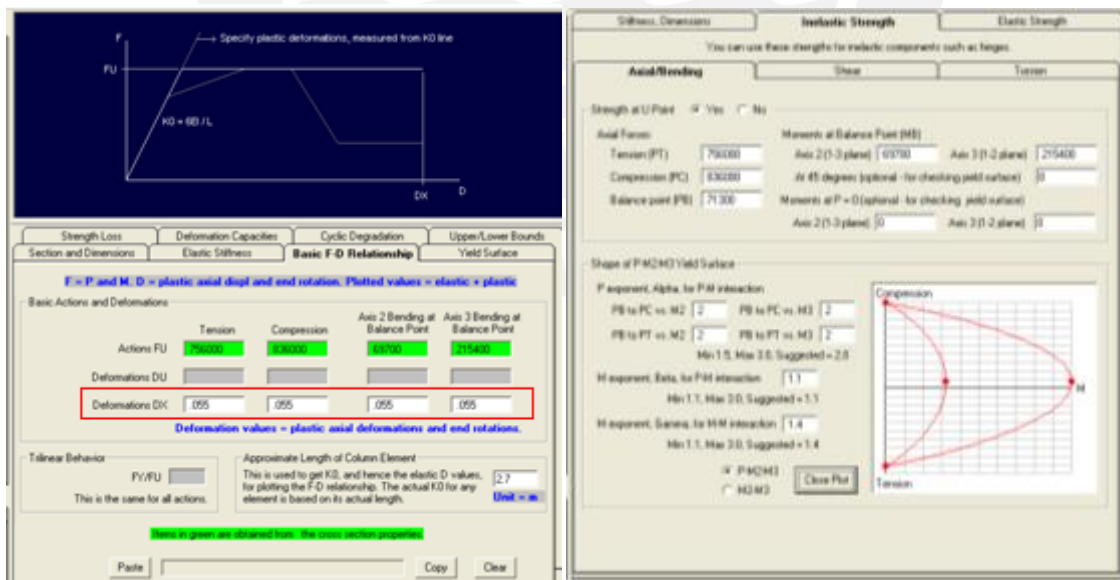
ρ_{sh}, ρ : cuantía de confinamiento y longitudinal.

f'_c : resistencia a la compresión del concreto (Mpa).

s_n : coeficiente de pandeo del acero ($s_n=12.7$).

α_{sl} : coeficiente de efecto de deslizamiento en el refuerzo (bond-slip) .

Para una columna típica de la edificación que se va analizar con un espaciamiento igual 10 cm teniendo $f'_c=21$ Mpa, $P / (A_g f'_c)=0.1$, $\rho=0.02$ y $\rho_{sh}=0.008$ y $\alpha_{sl} = 1$ se obtiene un valor promedio de $\theta_{cap,pl}=0.055$ rad que es la deformación máxima Fig. 4.16a. Adicionalmente se necesita ingresar los puntos principales del diagrama de interacción (P-M-M) para columnas que PERFORM 3D necesita para crear una superficie de fluencia Fig. 4.16b.



a) Modelo bilineal

b) Diagrama de interacción

Figura 4.16: Elemento “FEMA Column, Concrete Type”.

En el anexo B se muestra un ejemplo de modelación de columnas en PERFORM 3D.

4.5 Modelamiento de muros.

Se utilizara en la modelación elementos de fibras denominados “Shear Wall Element” que PERFORM 3D lo tiene predefinido, estos representan mejor el movimiento del eje neutro frente a cargas laterales y el efecto de la variación de la carga axial en la resistencia en muros (esbeltos), frente a elementos de plasticidad concentrada que no pueden representar dichas condiciones.

En la modelación se siguieron las recomendaciones dadas por (Powell, 2007) donde se asume que el muro se comporta a flexión ($h_w/l_w \geq 1.5$) Fig. 4.17, por lo tanto se considera un comportamiento elástico por corte. La zona de plastificación es asumida como $l_w/2$ o la altura del primer piso (el que sea menor), el módulo de elasticidad de corte efectivo (G_e) se asumió igual a $0.25 \cdot G$.

Cuando hay vigas de acople entre muros, PERFORM 3D considera vigas embebidas que son necesaria para capturar los momentos de empotramiento que se produce en los bordes Fig. 4.17, además dichas vigas deben ser más rígidas que las de acople; en promedio 10 veces.

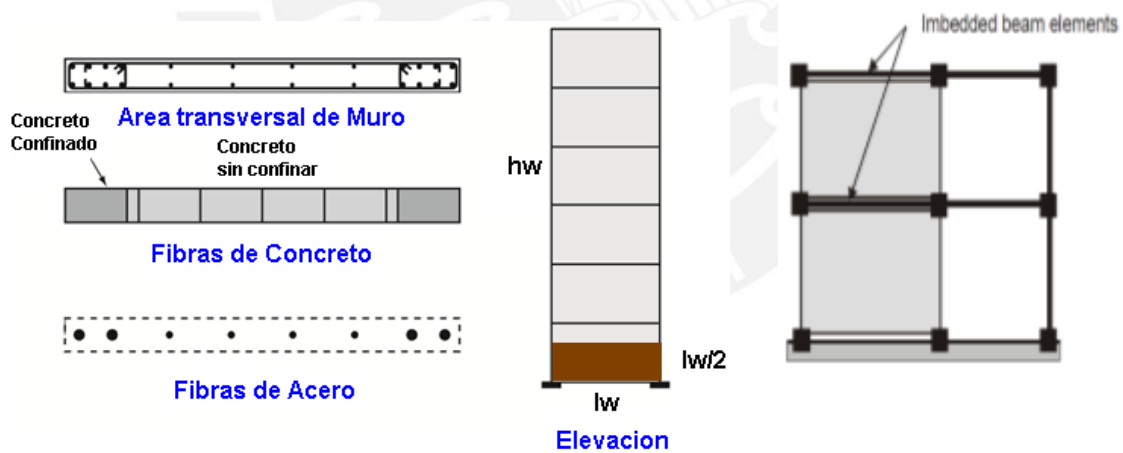


Figura 4.17: Elemento fibra para muros (adaptado PEER/ATC, 2010 y PERFORM 3D “Components and Elements”)

En la definición de elementos fibra tanto de concreto confinado, simple y acero estructural se debe ingresar las relaciones fuerza deformación de los materiales que lo conforman, se considera un modelo trilineal tanto para el concreto y el acero. Los valores para el acero son ajustados al modelo de (Mander, 1984) Fig. 4.18, no se considera pérdida de resistencia y degradación ciclica.

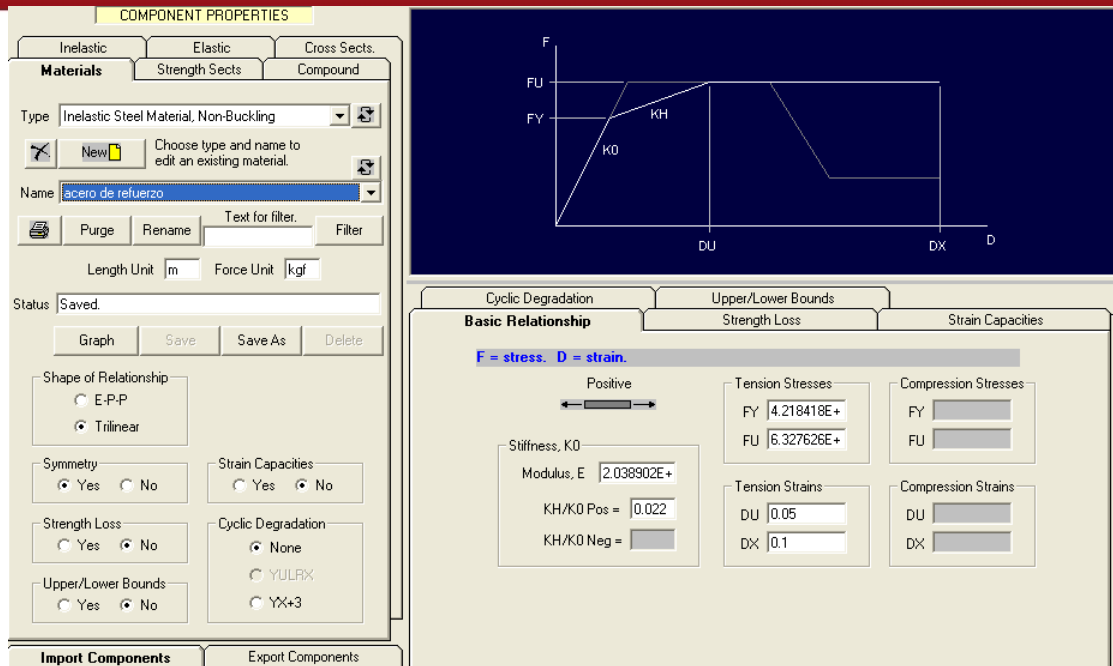


Figura 4.18: Parámetros de acero para elementos fibra en PERFORM 3D.

Los valores para el concreto confinado se ajustan al modelo de (Park et al., 1982) Fig. 4.19 considerando (conservadoramente) un aumento del 15% (24.15 MPa) de f'_c (21Mpa) debido a que se ha comprobado que la resistencia se incrementa en zonas de confinamiento con estribos.

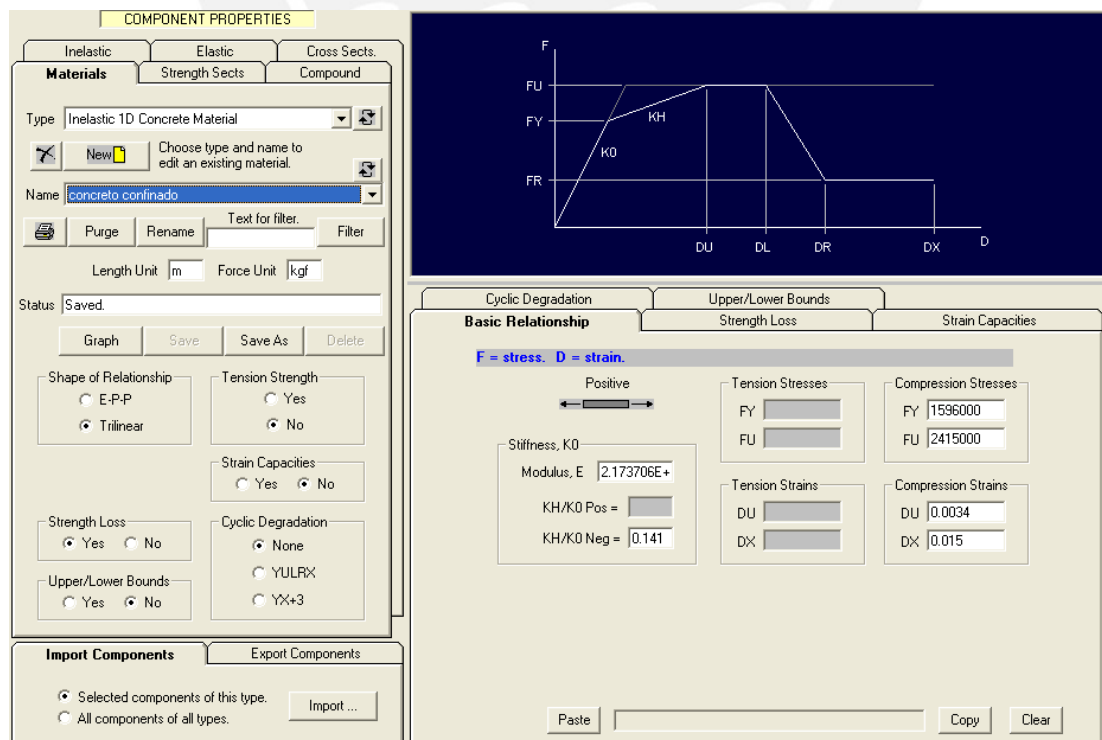


Figura 4.19: Parámetros de concreto confinado para elementos fibra en PERFORM 3D.

En el modelo para concreto simple se consideró valores para la deformación de de 0.0019 (resistencia máxima) y de 0.02 (resistencia última) Fig. 4.20. Para ambos modelos de concreto se consideró la pérdida de resistencia sin degradación cíclica.

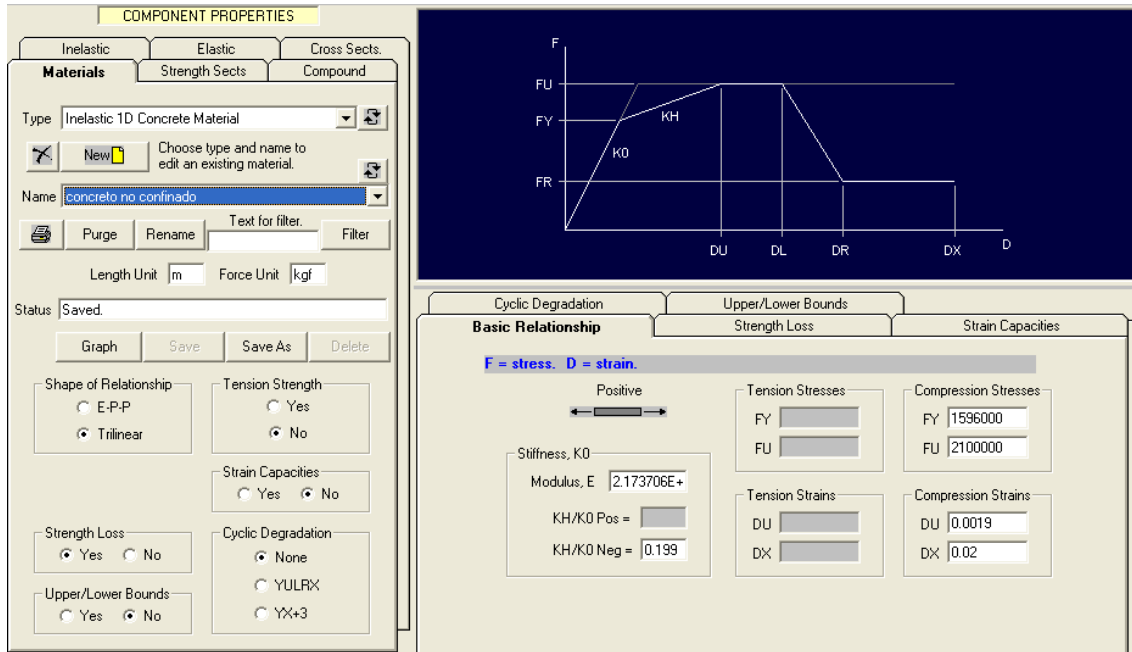


Figura 4.20: Parámetros de concreto simple para elementos fibra en PERFORM 3D.

En el anexo C se muestra un ejemplo de modelación de muros en PERFORM 3D que se utilizó en el modelamiento del edificio.

4.6 Consideraciones para el Análisis no lineal.

Para realizar un análisis dinámico no lineal tiempo historia en PERFORM 3D se consideró diafragmas rígidos (las losas no se modelaran) y nudos maestros donde se colocan las propiedades dinámicas Fig. 4.21.

La masa por nivel es asumida como $1D+0.25L$ (D =carga muerta y L =carga viva), el momento de inercia rotacional es con respecto al centro de masa (I_{CM}) para una sección rectangular está dado por:

$$I_{CM} = I_x + I_y \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$I_x = I_y = \frac{M \cdot L^2}{12}$$

Donde:

- M: masa de la sección.
- L: longitud perpendicular al eje analizado.

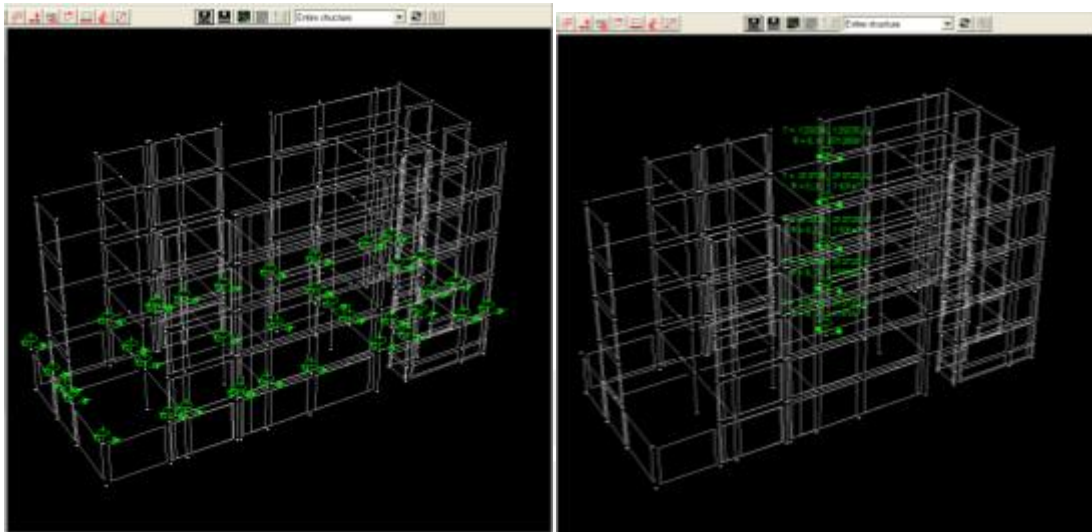


Figura 4.21: Diafragmas rígidos y nudos maestros en PERFORM 3D.

Para definir el amortiguamiento viscoso el programa considera dos opciones: modal y Rayleigh, pudiendo utilizar cualquiera de ellas.

El amortiguamiento Rayleigh está formado por la combinación de las matrices de masa y rigidez (Ec. 4.3), este amortiguamiento fue desarrollado para comportamiento elásticos, en análisis no lineal la matriz de rigidez cambia de valor, para solucionar ese problema el coeficiente β debe estar minimizado (PEER/ATC 72-1, 2010), PERFORM 3D considera esta recomendación.

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \tag{Ec. 4.3}$$

Los coeficientes α , β dependen de la frecuencias (ω) y fracción de amortiguamiento crítico (ξ) que es igual para los modos principales ecuaciones 4.4 y 4.5 (Chopra, 1995).

$$\alpha = \frac{\xi \cdot 2 \cdot \omega_i \cdot \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \tag{Ec.4.4}$$

$$\beta = \frac{\xi \cdot 2}{\omega_i + \omega_j} \tag{Ec. 4.5}$$

El valor de ξ para comportamiento no lineal en edificios de concreto es: 3% para edificios altos y 5% para edificios bajos PEER/ATC 72-1.

El amortiguamiento Modal está dado por la ecuación 4.6 (Chopra, 1995), esta opción también es adecuada para el análisis no lineal por qué no depende de la rigidez:

$$[C] = [M] \left(\sum_{n=1}^N \frac{4\pi\zeta_n}{T_n} \phi_n \phi_n^T \right) [M] \quad (\text{Ec. 4.6})$$

PERFORM 3D tiene una opción donde se combina el amortiguamiento modal con un pequeño porcentaje de amortiguamiento tipo Rayleigh (0.2%), esta alternativa también se utilizo.

En el presente trabajo se utilizara amortiguamiento tipo Modal con $\xi = 5\%$ (edificio bajo) con amortiguamiento tipo Rayleigh (0.2%).

Las principales consideraciones en el análisis no lineal son:

- El comportamiento no lineal de vigas y columnas es mediante la plasticidad concentrada.
- Al modelar las vigas con elementos “FEMA” los efectos de deslizamientos “bond-slip” no son definidos explícitamente en el análisis.
- El comportamiento no lineal por corte en vigas y columnas no se consideró debido a que no es crítico.
- No se considera perdida de resistencia en las vigas y columnas debido a que son elementos principales.
- El intervalo de integración considerado fue $\Delta T = 0.005s$.
- Los muros de concreto tienen un comportamiento no lineal por flexión y elástico por corte.
- El terreno de fundación es de tipo S1 (suelo rígido), se considera apoyos fijos y empotrados en la cimentación.
- La masa de la estructura se considera uniformemente distribuida y se concentra en el centro de gravedad de cada nivel, mediante diafragma rígido.
- Rigidez torsional de vigas, columnas y muros no son consideradas.
- Deformaciones axiales en vigas no son consideradas.

4.7 Modelamiento de disipador ADAS.

La modelación del disipador ADAS en PERFORM 3D se puede hacer de varias formas como: elemento link, rotulas “Hinge” a cortante y como un tipo de aislador de base de caucho “Rubber Type”; en el presente trabajo se utilizó el elemento “Rubber Type” para modelar el disipador ADAS.

Uno de los primeros ensayos para determinar las propiedades de los elementos ADAS y su comportamiento dinámico fue realizado por (Whittaker et al., 1989), donde se ensayó un pórtico con disipadores ADAS Fig. 4.22, las características de masa y propiedades del pórtico están dadas en las Tablas 4.3 y 4.2.

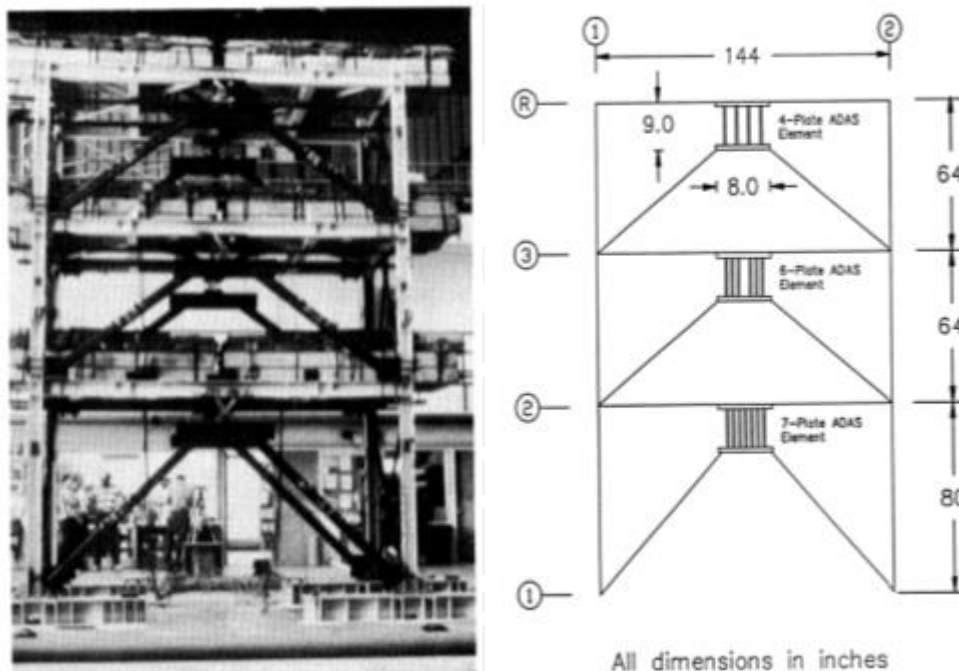


Figura 4.22: Ensayo de disipadores ADAS (Whittaker et al., 1989).

Para mostrar el comportamiento dinámico y precisión del disipador ADAS en PERFORM 3D comparado con un ensayo real, se procedió a modelar el ejemplo de la figura 4.22. Primeramente se introdujeron al programa las propiedades de vigas, columnas y masas.

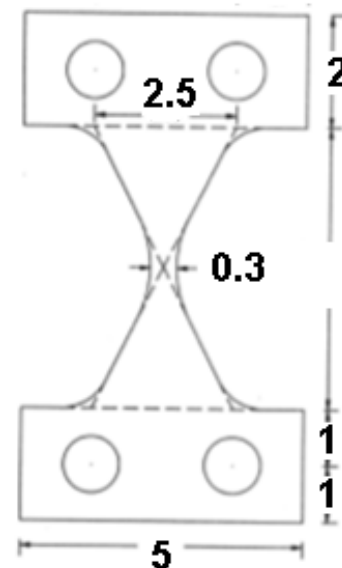
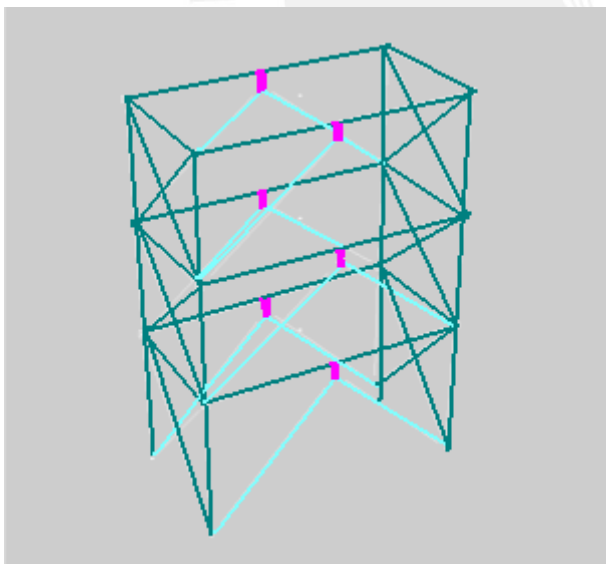
Tabla 4.2: Propiedades de vigas y columnas.

	Girder - W6×12		Column - W5×16	
	Nominal	Actual	Nominal	Actual
b (in.)	4.00	4.02	5.00	5.00
d (in.)	6.00	6.03	5.00	4.97
t_w (in.)	0.23	0.24	0.24	0.25
t_f (in.)	0.28	0.28	0.36	0.37
A (in. ²)	3.54	3.61	4.70	4.70
I_x (in. ⁴)	21.7	22.2	21.3	21.0
S_x (in. ³)	7.25	7.35	8.53	8.48
Z_x (in. ³)	8.23	8.37	9.61	9.55
σ_y (ksi)	45.9	-	45.9	-
τ_y (ksi)	26.5	-	26.5	-
P_y (kips)	126	-	216	-
M_y (kip-in)	333	-	392	-
M_p (kip-in)	378	-	441	-

Tabla 4.3: Masa total por niveles.

Floor	ADAS-3 (kips)
Roof	31.1
3rd	31.8
2nd	32.1
Total	95.0

Luego se modelo el pórtico tridimensionalmente en PERFORM 3D utilizando elementos FEMA para vigas y columnas del tipo “Steel Type” Fig. 4.23a, el dissipador tiene un espesor igual a 0.25 pulg y una geometría mostrada en la Fig. 4.23b.



a) Pórtico modelado en PERFORM 3D. b) Geometría del dissipador (pulg).
Figura 4.23: Modelamiento del pórtico con dissipadores ADAS (Whittaker et al., 1989).

Las propiedades de los dissipadores ADAS están dadas en la Tabla 4.4, la Fig. 4.24 muestra la modelación del dissipador con 7 placas, elemento “Rubber Type”.

Tabla 4.4: Propiedades de los disipadores.

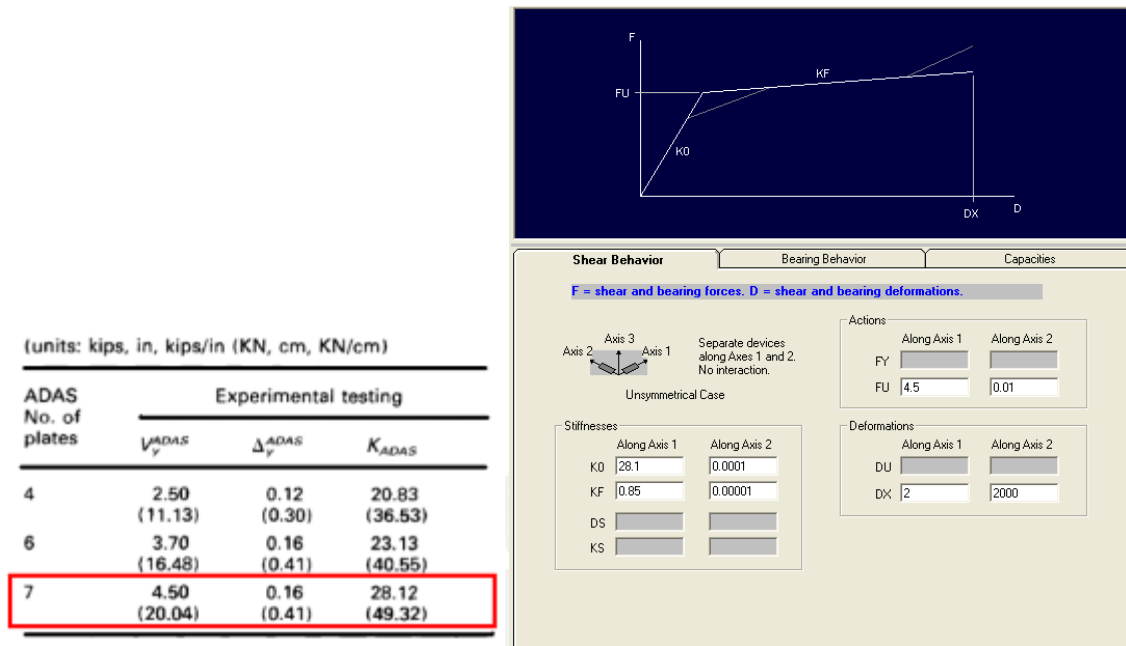
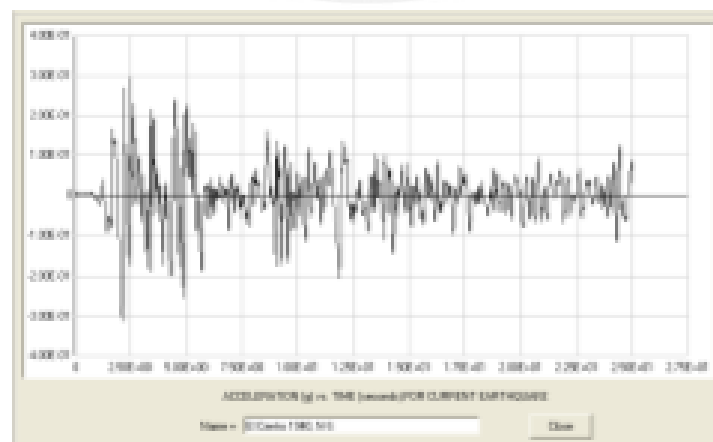
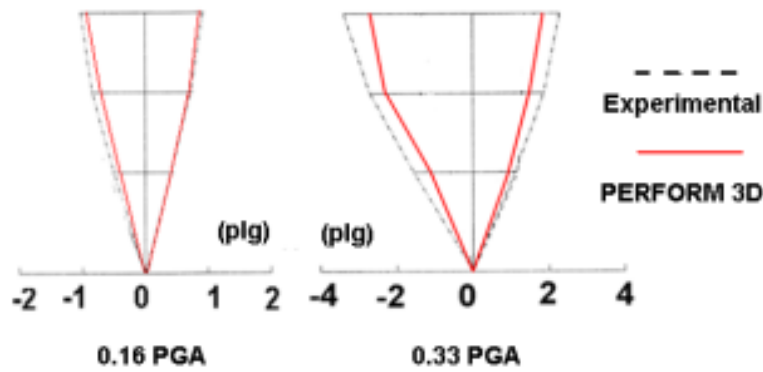


Figura 4.24: Modelamiento de ADAS con 7 placas.

Whittaker et al. (1989), ensayo el pórtico con diferentes aceleraciones, se ha comparado resultados experimentales obtenidos para el Centro 1940 N-S con PGA de 0.16g y 0.33g con los obtenidos en PERFORM 3D Fig. 4.25. En la Fig. 4.25b se ha demostrado que los resultados analíticos son cercanos a los experimentales siendo generalmente un poco menores; esta diferencia se debe a que no siempre se logra el empotramiento perfecto de los disipadores y las propiedades de los materiales no son constantes en los elementos. El comportamiento histérico del disipador es estable Fig. 4.26



a) Sismo el Centro 1940 N-S.



b) Comparaciones de desplazamientos por nivel.

Figura 4.25: Desplazamientos laterales en pórtico de ensayo (Whittaker et al., 1989).

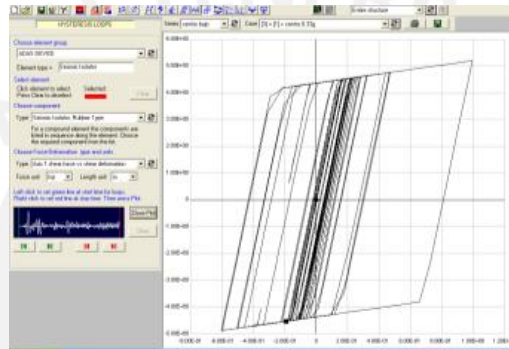


Figura 4.26: Comportamiento histerético para dissipador ADAS de 7 placas.

Su and Hanson (1990) ensayaron el mismo pórtico de Whittaker et al. (1989) para una aceleración de Chile 1985, comparo resultados experimentales con analíticos donde comprobó que los resultados son similares y generalmente menores Fig. 4.27.

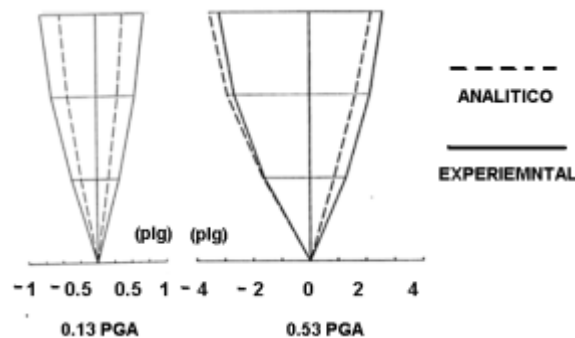


Figura 4.27: Comparaciones de desplazamientos, Chile 1985 (Su and Hanson, 1990).

De esta manera se ha verificado que el modelamiento del dissipador ADAS en PERFORM 3D es correcto y se puede utilizar en el análisis de edificaciones.

CAPÍTULO V

5. Caso de estudio: Edificio multifamiliar

Se presenta en un análisis no lineal comparativo para una edificación de baja altura de concreto armado con/sin disipadores ADAS para un sismo severo; se evaluó el comportamiento estructural con criterios del FEMA 356 y ACE-41 y se diseñaron los disipadores ADAS para reducir los daños estructurales.

5.1 Características de la edificación.

La edificación tiene 5 niveles y está compuesta de muros de corte de concreto armado tiene una aceleración de diseño en la base igual a $0.4g$, factor de reducción $R=4.5$ (irregular) y fue diseñada con la norma vigente (RNE, 2007) y una carga viva de 200 kg-f/m^2 (0.002 Mpa). En la Fig. 5.1 se muestra la distribución de los muros de corte y las columnas, los espesores de los muros varían entre 0.15m y 0.20m ; todos tienen refuerzo horizontal y vertical con confinamiento en los extremos (Anexo E) con una cuantía de acero que varía entre 0.25% a 0.473% , en la Fig. 5.3 se muestra PL-01(muro típico).

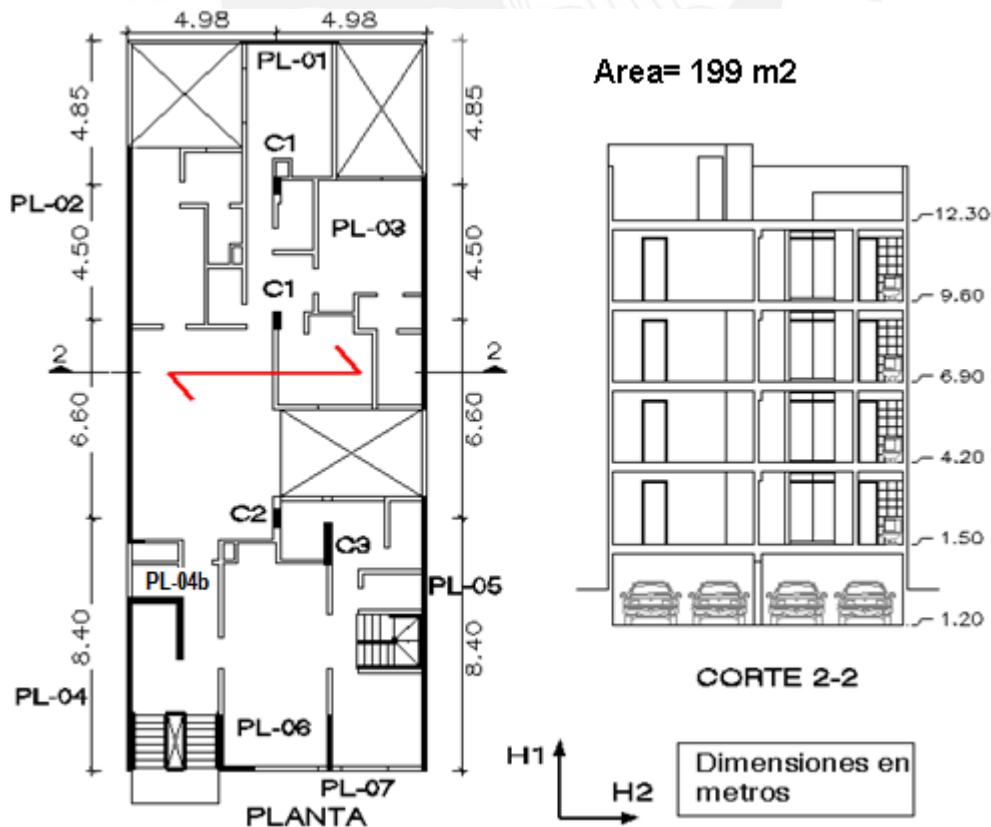


Figura. 5.1: Características de la edificación de baja altura.

La losa es unidireccional de espesor $h=0.20\text{m}$, las vigas principales tienen una sección $0.25\text{m}\times 0.55\text{m}$ (Anexo E) Fig. 5.2. La estructura presenta gran cantidad de muros en la dirección H1 (zona rígida) y en H2 presenta muros con pórticos (zona flexible).

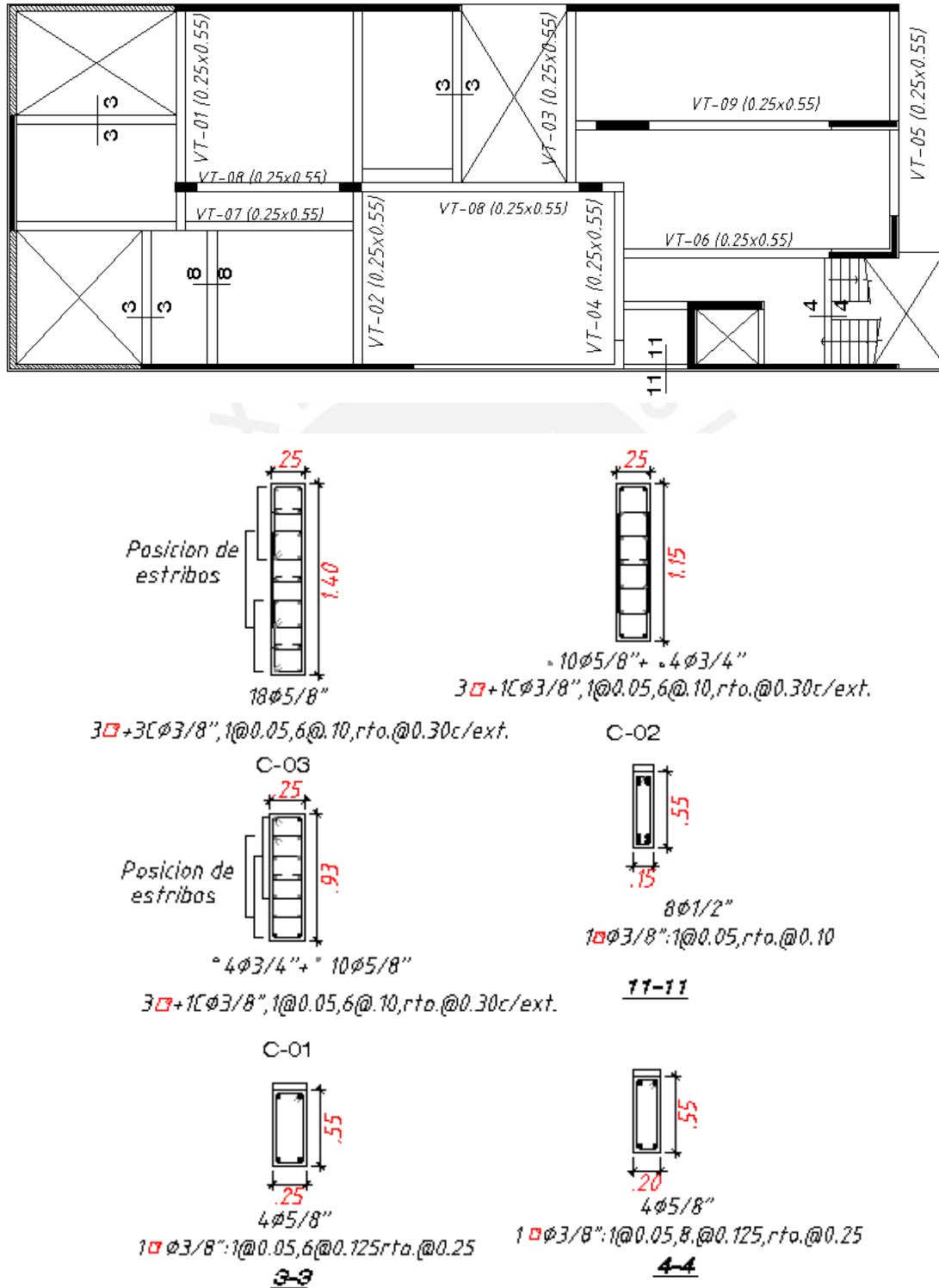


Figura. 5.2: Vigas y columnas en la edificación a analizar.

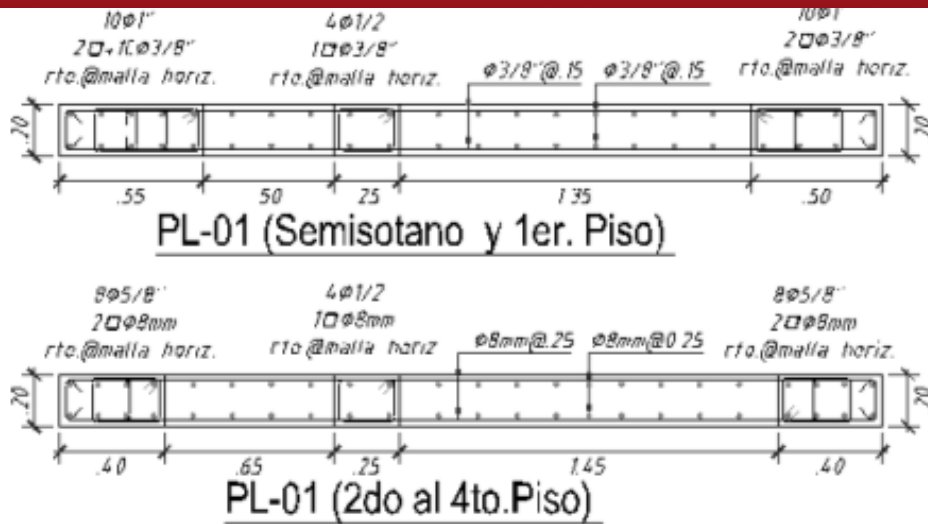


Figura. 5.3 Muro de concreto PL-01.L-01

La resistencia del concreto es $f'_c=21$ MPa (210 kg-f/cm²), módulo de Young de 21316.7 MPa (217370.65 kg-f/cm²) para el acero el $f_y=420$ MPa (4200 kg-f/cm²), y coeficiente de Poisson $\nu=0.15$. El peso específico del concreto es 24 kN/m³ (2400 kg-f/m³), de la tabiquería 18 kN/m³ (1800 kg-f/m³). Para el cálculo de masas rotacionales se aplicó la ecuación 4.2 (Tabla 5.1) y su ubicación es en el centro de masa (CM) con 5% de excentricidad.

Tabla 5.1: Masas utilizadas en la modelación.

	1,2,3 y 4 Nivel	5 Nivel
Mx (kg-f·s²/m)	21775.8	13167.7
My (kg-f·s²/m)	21775.8	13167.7
MI (kg-f·s²/m)	1131094.2	683962.7

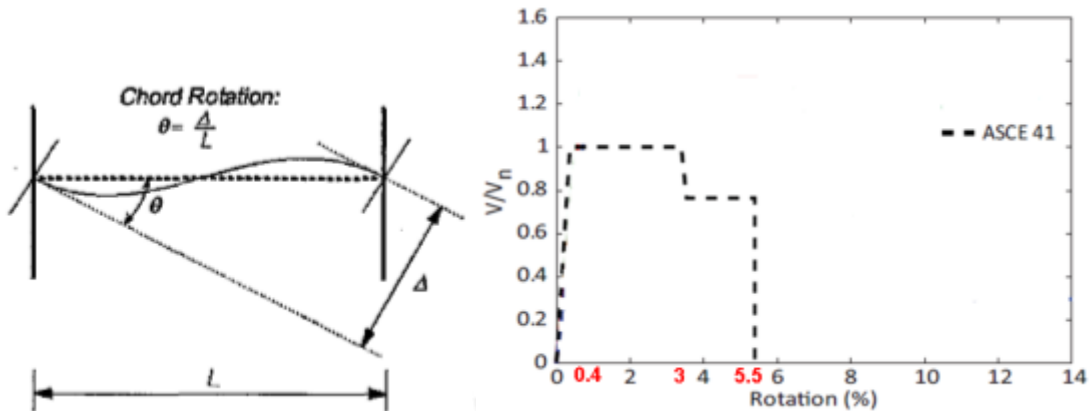
5.2 Modelamiento de la edificación.

Se procedió a modelar la edificación considerando las propiedades, geometría dada en la Figs. 5.1, 5.2; anexo D y las consideraciones dadas en el Capítulo IV. La modelación de viga 11 que es una viga de acople ($l_n/h \leq 4$) entre PL-02 y PL-04 fue modelada por corte, donde el esfuerzo máximo por corte está dada por:

$$\frac{V_n}{b \cdot d} = \frac{5}{6} \sqrt{f_c} \text{ (Mpa)} = 10 \sqrt{f_c} \text{ (psi)} \tag{Ec. 5.1}$$

Para la modelación no lineal por corte se necesita valores de la rotación Fig. 5.4a y

la “blackbone curve” que está dada por la Tabla 6-18, Shear Wall Coupling Beams ASCE-41 Fig. 5.4b.



a) Rotación

b) “blackbone curve” según ASCE 41

Figura. 5.4: Valores considerados para vigas de acople por corte ($l_n/h \leq 4$).

La modelación en PERFORM 3D se hace mediante el elemento “Shear Hinge, Displacement Type”, para la viga V-11(Fig. 5.2) y la ecuación 5.1 se obtiene $V_n = F_u = 25361 \text{ kg-f}$ (Fig. 5.5). Con $l_n = 1.8\text{m}$, y valores de la Fig. 5.4b son necesarios para definir el elemento no lineal por corte (Fig. 5.5) y posteriormente el componente no lineal por corte (Fig. 5.6).

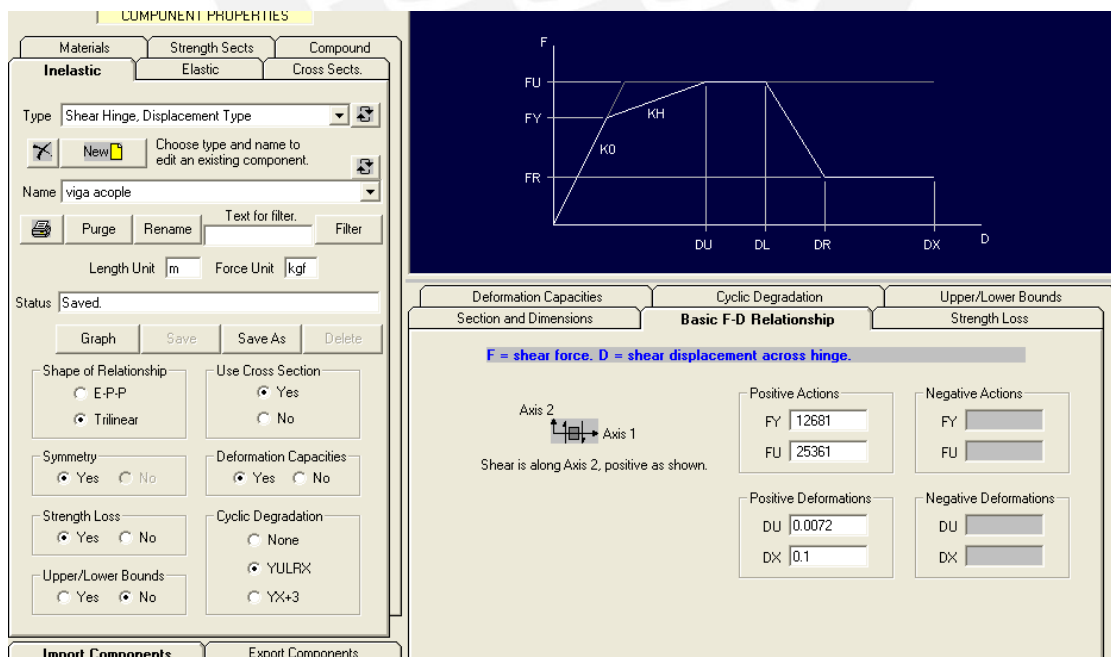


Figura. 5.5: Propiedades no lineales por corte en PERFORM 3D

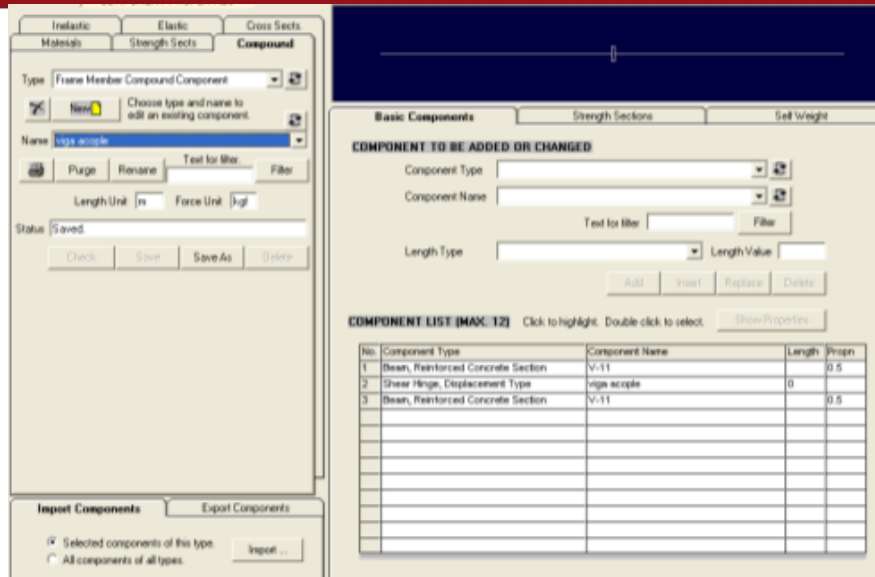


Figura. 5.6: Componente no lineal por corte en PERFORM 3D.

Con estas consideraciones se procede a modelar la estructura en 3D en PERFORM 3D Fig. 5.7, se obtuvo como periodo fundamental $T=0.51s$ en H2 y $T=0.17s$ en H1.

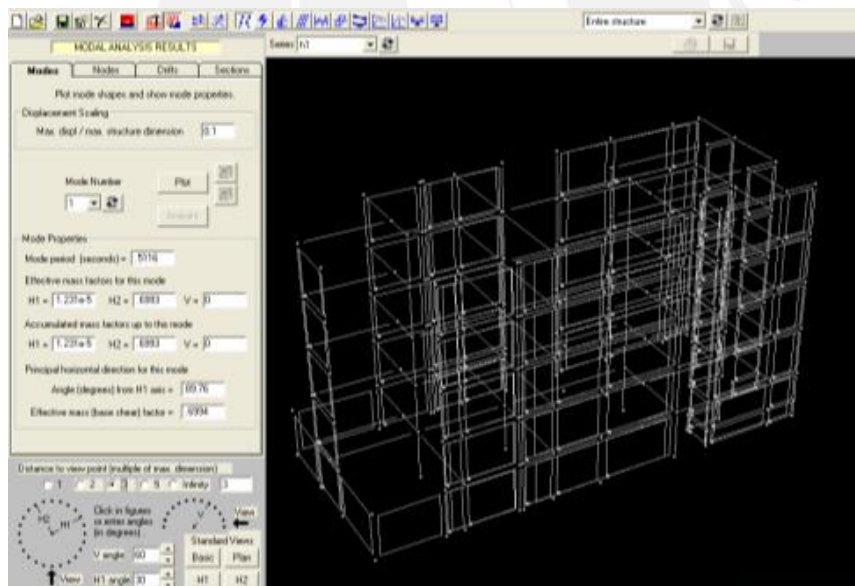


Figura. 5.7: Modelamiento de la estructura en PERFORM 3D.

5.3 Registros considerados para el análisis.

Para la evaluación del comportamiento sísmico de la edificación, se necesita conocer el valor de la aceleración máxima del terreno para un sismo severo (muy raro), dicho sismo sería el equivalente al Máximo Terremoto Considerado (MCE) indicado en la norma (ASCE-07, 2005). El sismo MCE se define como la aceleración que es excedida un 2%

en 50 años con un periodo de retorno de 2475 años, esta aceleración se obtiene de un análisis estadístico en zonas donde se tiene un buen registro de sismos importantes. Un valor de aceleración para sismo raros para la costa del Perú es de 0.5g (PGA) fue dado por (Muñoz A. et al., 2000) mostrado en la Tabla 5.2, es el valor utilizado en el presente estudio y equivale a una aceleración que es excedida en 5% en 50 años con un retorno de 949 años. Cabe mencionar que la aceleración de diseño en la norma E030 equivale a una aceleración que es excedida en 10% en 50 años con un retorno de 475 años (equivalente a los 2/3 del MCE).

Tabla 5.2: Aceleraciones y periodos de retorno (Muñoz et al., 2000).

	Sismos Frecuentes	Sismos Ocasionales	Sismos Raros	Sismos Muy raros
Periodo de retorno	45	75	≈ 500	≈ 1000
Aceleración en la roca para la costa del país (g)	0.2	0.25	0.4	0.5

El (ASCE-07, 2006) para análisis tiempo historia recomienda usar siete pares de registros de aceleración que sean representativas del lugar donde está ubicado la estructura, el mínimo de registros son tres pares; si se utilizan menos de siete pares se debe considerar el que produzca mayores esfuerzos. En el presente trabajo la edificación está ubicada en Lima se utilizaron seis pares de registros propios de la zona Tabla 5.3 (grava gruesa) y Fig. 5.8. Cabe mencionar que dichos registros fueron utilizados para formar la norma sismorresistente peruana E030.

Tabla 5.3: Características de los registros sísmicos para Lima.

COD	FECHA	DENOMINACION	PGA g	PGV cm/seg	PGD cm	M
S1	17/10/1966	Comp. N82W	0.184	13.23	7.35	7.5
S2	17/10/1966	Comp. N08E	0.275	-21.6	-16.6	7.5
S3	31/05/1970	Comp. L	0.107	4.71	1.55	7.7
S4	31/05/1970	Comp. T	0.1	6.98	2.64	7.7
S5	03/10/1974	1421 GCT Comp. N08E	0.182	10.3	-5.34	7.5
S6	03/10/1974	1421 GCT Comp. N82W	0.196	14.48	6.41	7.5

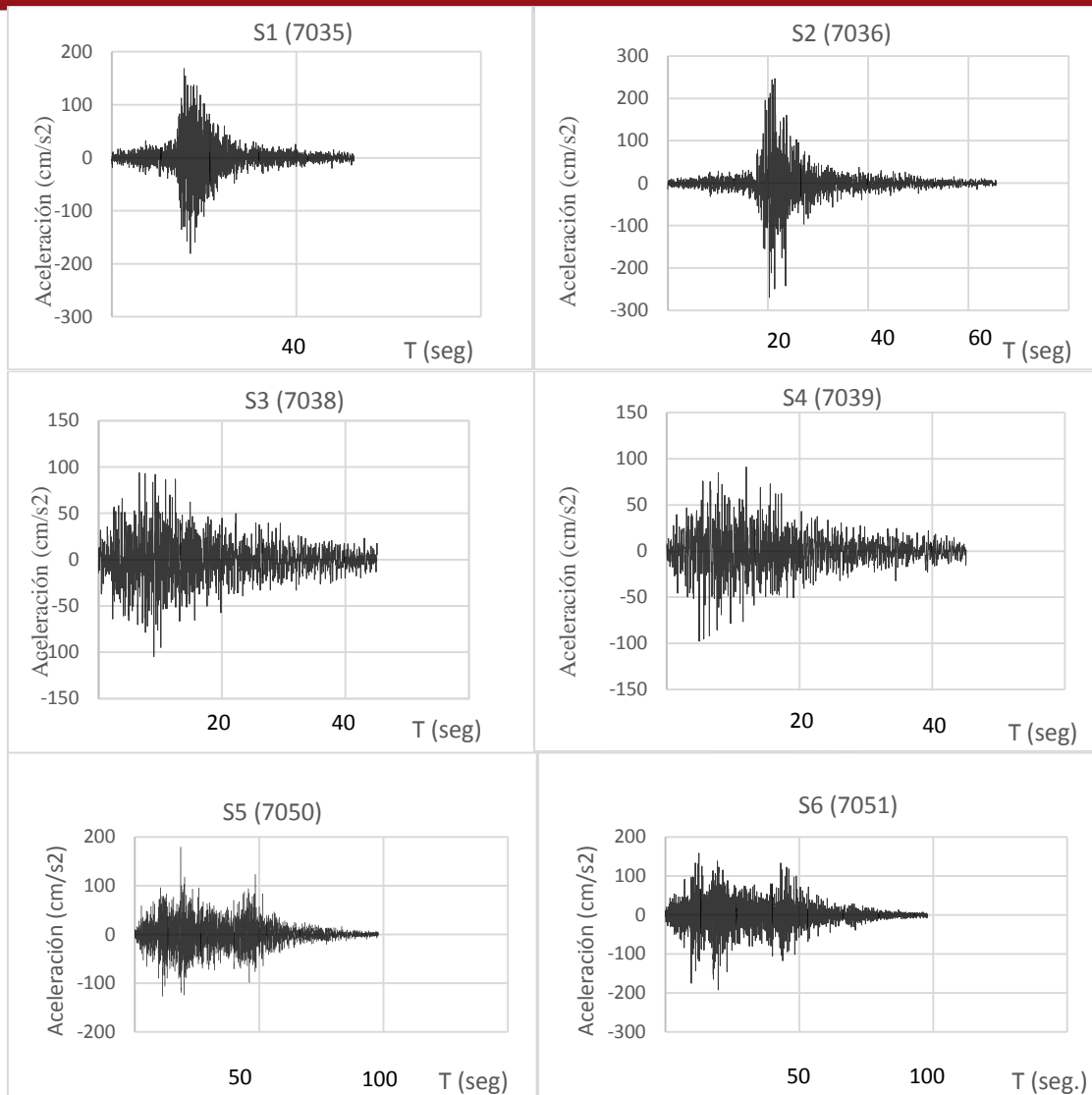


Figura 5.8: Gráficos de registros sísmicos para Lima.

Para el escalamiento de los registros hay dos métodos muy usados: el directo a la máxima aceleración del terreno (PGA) y el propuesto por el (ASCE-07, 2010). El método del ASCE-07 señala que para un par de registros, se crea una nueva señal formada por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las componentes (SRSS). Con la nueva señal se procede a escalar con un valor de tal manera que cuando se compara su espectro de respuesta con el espectro de respuesta de diseño dado en la norma E030; se debe cumplir que dicha comparación no debe ser menor sobre $0.2 T_n$ y $1.5 T_n$ (T_n es el periodo fundamental de la estructura). Si cumple la comparación descrita previamente el valor que se escalo es el factor de amplificación del par de registros.

Debido a que los máximos periodos de la estructura en ambos sentidos son cortos ($TH_1=0.51s$, $TH_2=0.17s$) que es propio de una estructura de baja altura se comparó las

aceleraciones de los espectros de respuesta de los registros de la Tabla 5.3 con el espectro de diseño de la norma ($Z=0.5$, $U=1$, $S=1$, $T_p=0.4$ y $R=1$) escalados directamente a una misma aceleración ($0.5g$); se verifico que tienen una demanda similar en TH1 Y TH2 Fig. 5.9. Tomando esta consideración el método de escalamiento que se utilizo es el directo a la máxima aceleración del PGA de $0.5g$. Si la estructura fuese más flexible (periodo de 1s a mas) el método ASCE-07 sería el utilizando.

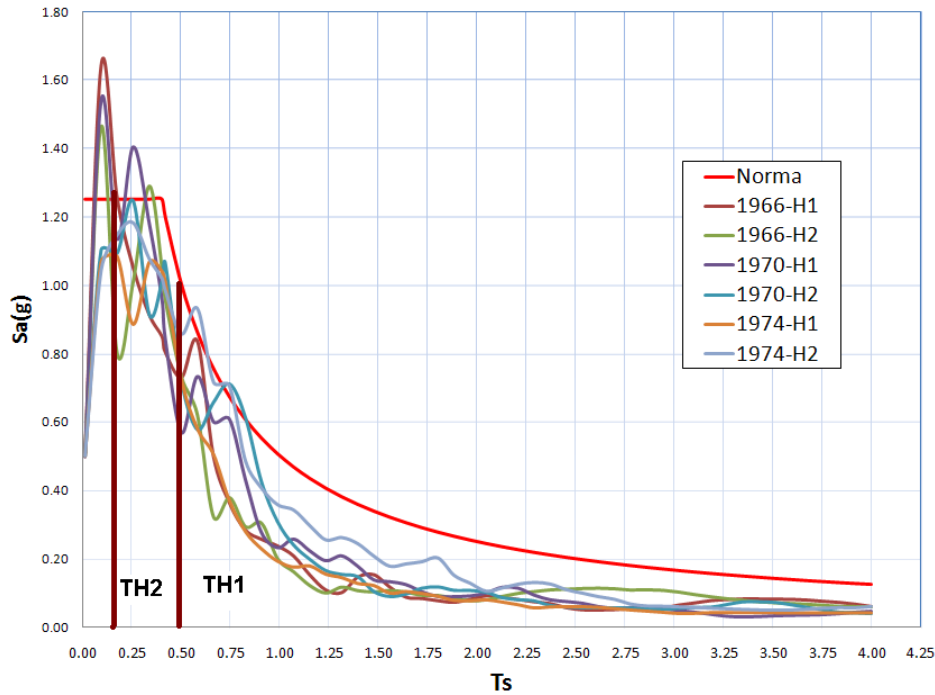
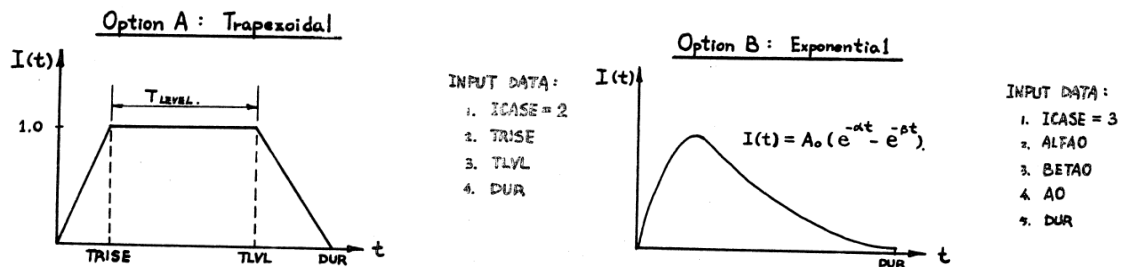


Figura 5.9: Espectros de respuesta vs espectro de diseño E030.

Adicional a los 6 registros escalados se generó un registro sintético que sea compatible con el espectro de diseño de la norma peruana E-030 utilizando el programa SIMQKE (Gasparini and Vanmarcke 1976). El programa se basa en funciones de intensidad en la cual se define la duración y la variación de la intensidad, en la Fig. 5.10 se muestra las diferentes funciones de intensidad del SIMQKE.



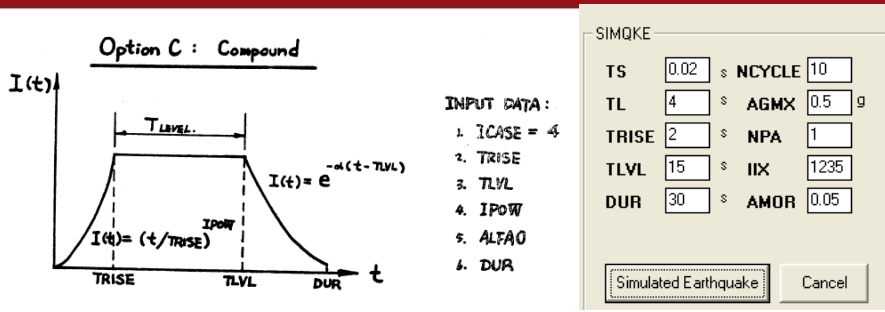


Figura 5.10: Funciones de intensidad de SIMQKE (Gasparini 1976).

Para la generación de la señal sintética se pueden utilizar la opción A o C, se considera la duración total de 30s con una fase intensa que comienza en 2s y termina en 15s, aceleración máxima de 0.5g y con un espectro basado en la norma E.030.

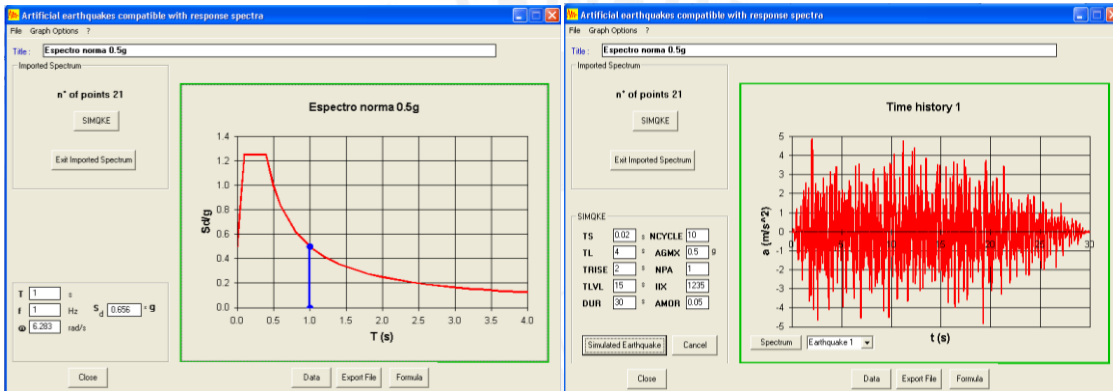


Figura 5.11: Señal sintética para un PGA 0.5g creado por el programa SMQKE.

El espectro de respuesta que genera la señal sintética es comparado con el espectro de la norma, se puede notar que guarda una buena similitud Fig. 5.12.

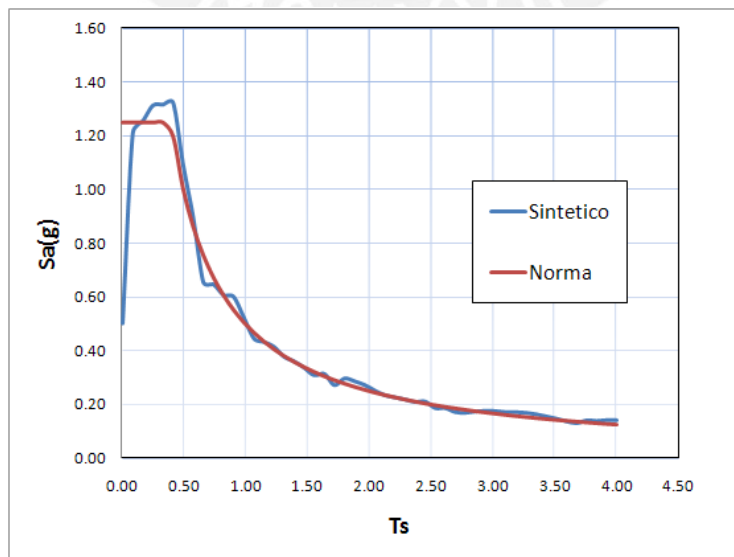


Figura 5.12: Comparación de espectro de respuesta norma E030-SIMQKE

5.4 Factores para evaluar el comportamiento estructural

Se emplearon dos formas de evaluación: rotaciones y deformaciones.

5.4.1 Rotaciones.

Están dadas por el ASCE 41-06, resumidas en la Tabla 5.4 y Fig. 5.13,

Tabla 5.4: Deformaciones límites para el comportamiento estructural.

Sismo aplicado	Moderado	Mayor	Severo
Nivel de Desempeño (daño)	No Daños (IO)	Reparable (LS)	No Colapso (CP)
Deformación en Columnas (rad.)	$\theta < 0.005$	$\theta < 0.01$	$\theta < 0.02$
Deformación en Vigas (rad.)	$\theta < 0.005$	$\theta < 0.01$	$\theta < 0.025$
Drift	0.05	0.01	0.02
Muro de concreto (rotaciones en rad.)	0.03	0.06	0.09

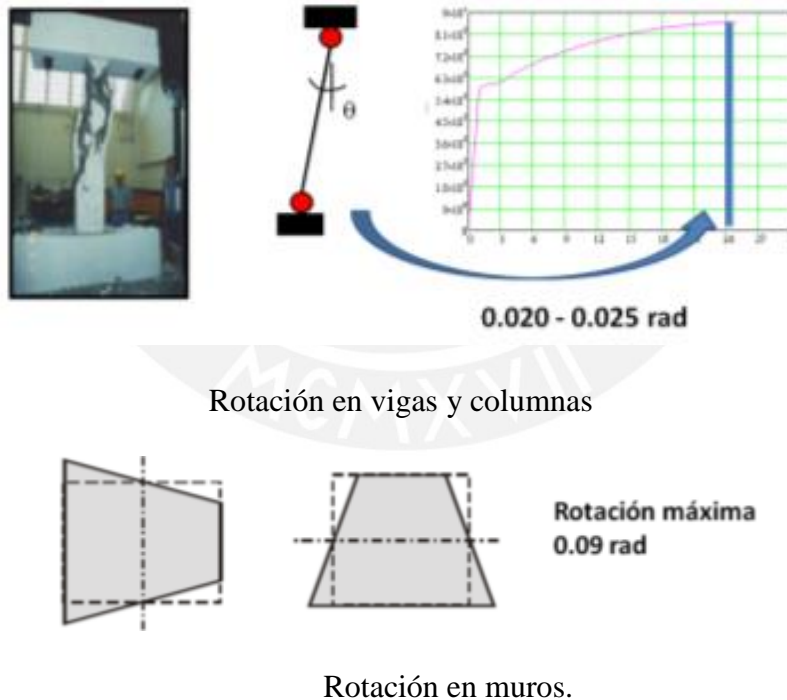
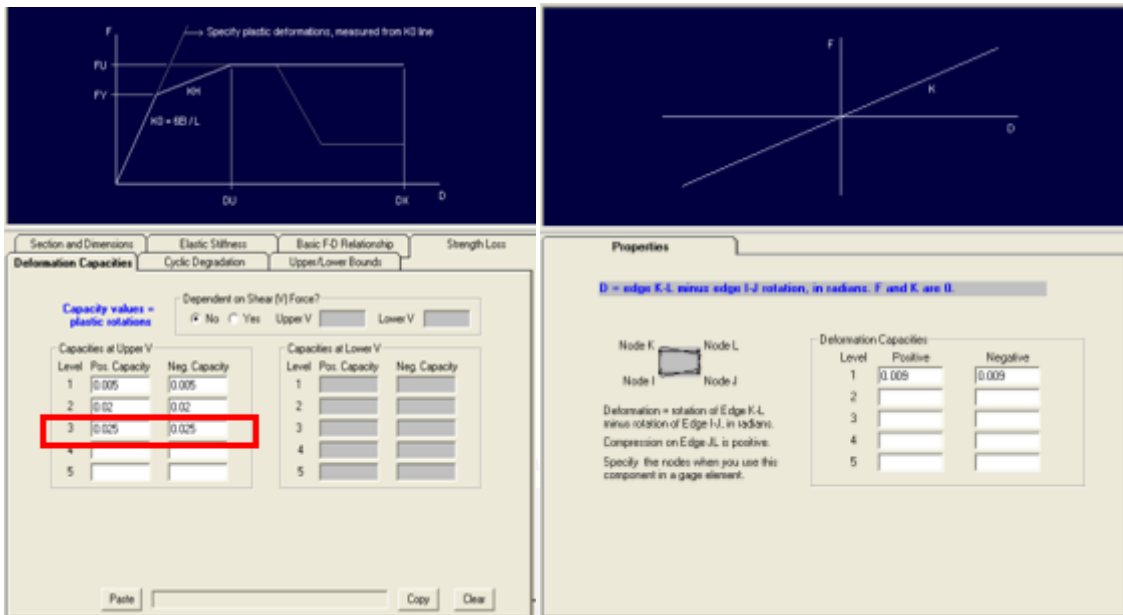


Figura 5.13: Rotaciones en vigas, columnas y muros adaptado de (PEER/ATC, 2010) y (CSI, 2011).

Las deformaciones límites en vigas y columnas son definidas mediante la opción “Deformation Capacities” y la rotación en muros se hacen mediante el elemento “Rotation

Gage, Wall Type 4 nodes” Fig. 5.14, los Drift se definen mediante selección de nodos como cualquier otro programa de análisis.



a) Vigas y/o columnas b) Muros
Figura 5.14: Definición de deformaciones límites en PEFORM 3D.

5.4.2 Deformaciones.

Las deformaciones se miden en los muros estructurales, evaluando las deformaciones del acero, concreto simple, confinado que son los componentes (fibras) de los elementos “Shear Wall Element”. El comportamiento de los muros estructurales depende de la relación h_w/l_w (Fig. 4.17) y se pueden clasificar en:

- **Esbeltos:** $h_w/l_w \geq 2$, donde el comportamiento es a flexión, la fuente de disipación de energía es la fluencia del acero, se debe evitar la falla por tracción diagonal (corte), deslizamiento por cortante en la base como en una junta (Fig. 5.15).

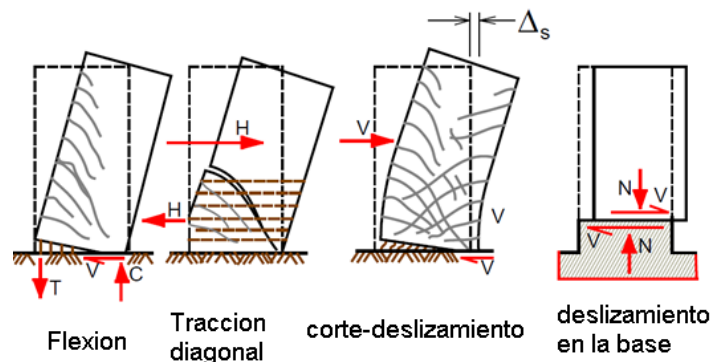


Figura 5.15: Modos de falla en muros esbeltos (FEMA P-751).

- **Bajos (Low rise):** $h_w/l_w < 1.5$, donde el comportamiento predominante es a corte, con una resistencia alta y generalmente tienen un comportamiento lineal. La falla común es por tensión y tracción diagonal y posteriormente aplastamiento del concreto en el alma Fig. 5.16, para evitar dichas fallas se debe proveer refuerzo horizontal y vertical.

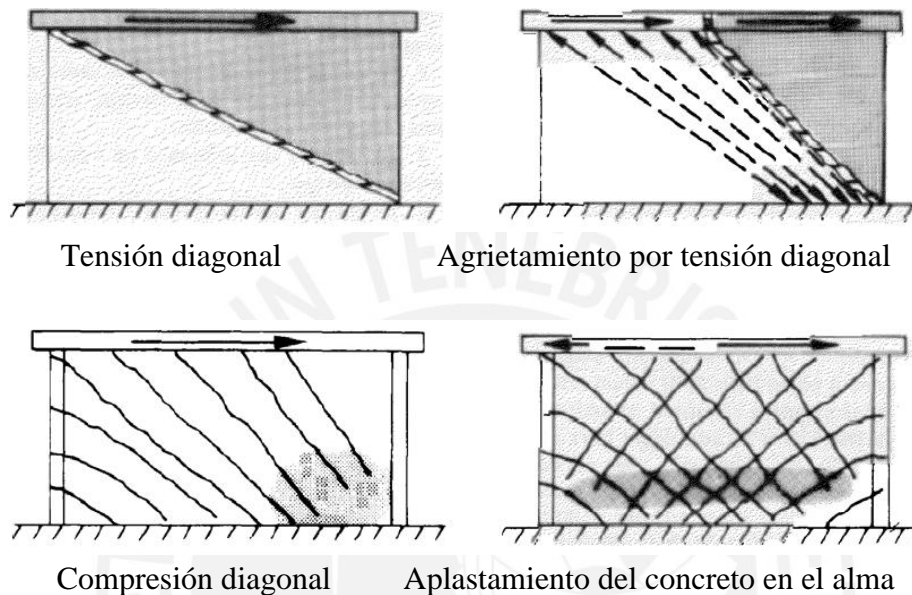


Figura 5.16: Modos de falla en muros bajos (Paulay et al., 1982).

Para evitar las fallas de tracción diagonal (muros esbeltos), tensión y compresión diagonal (muros bajos) se debe limitar el esfuerzo de corte ($V_n/t_w l_w$), diversos estudios y códigos recomiendan un valor máximo; el más usado es $\frac{5}{6} \sqrt{f_c}$ (Mpa) = $10 \sqrt{f_c}$ (psi) (ACI Committee 318, 2008).

La resistencia al corte para muros de concreto armado está dado por la Ecu. 5.1 dada en la norma E060 de concreto armado sección 11.10, que es la misma dada por el ACI Committee 318, 2008 sección 21.7.4.

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f_c} + \rho_t f_y) = V_c + V_s \quad (\text{Ecu. 5.1})$$

Donde:

A_{cv} = área de la sección transversal ($t_w l_w$).

α_c = coeficiente que varía entre: $0.17 (h_w/l_w \geq 2) \leq \alpha_c \leq 0.25 (h_w/l_w \leq 1.5)$ en Mpa.

ρ_t = cuantía por refuerzo de corte.

La ecuación 5.1 es una ecuación semi-empírica basada en la analogía de la cercha (usada en vigas) donde la resistencia al corte está dado por la contribución del acero (V_s) y del concreto (V_n). La contribución del concreto está dada por la zona de compresión, trabazón de agregados y el efecto dowel (similar al análisis en vigas) y del acero por el refuerzo horizontal a través del acción de cercha.

PERFORM 3D utiliza el esfuerzo de corte ($V_n/t_w l_w$) para verificar la resistencia por corte de los muros (V_n), en el presente trabajo se controlara que para un sismo muy raro la fuerza de corte no sobrepase en más 15 % el valor V_n . La definición de esfuerzo de corte se hace mediante la definición del componente “Elastic Shear Material for Wall”, para todas las placas se calculó el esfuerzo de corte (Anexo D); por ejemplo para la placa PL-01 Fig. 5.17.

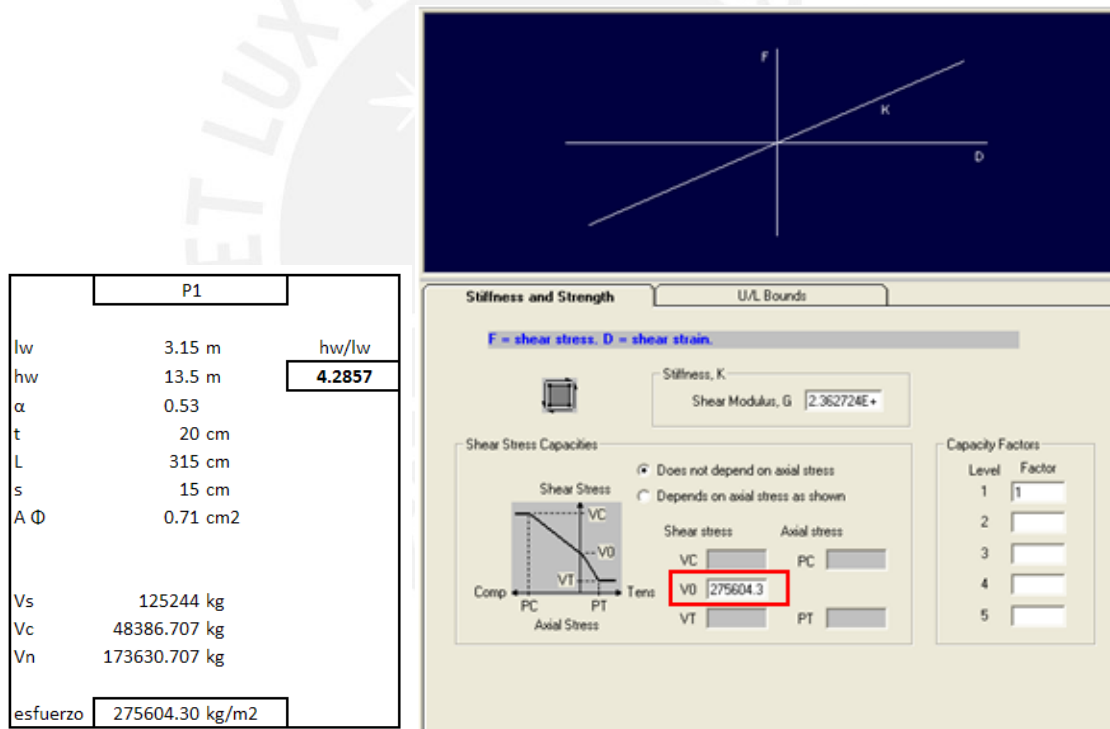



Figura 5.17: Calculo de esfuerzo de corte para PL-01 e ingreso de datos en PERFORM 3D.

Los valores de deformación del acero de refuerzo y concreto en muros estructurales están dadas en la Fig. 5.18b (Powell G., 2007). Se asumió que las deformaciones del acero en zona plastificada fue igual a 1% (0.01) y fuera de ellas fue igual a 0.0036 (1.5 veces la deformación elástica) como se muestra en la Fig. 5.18a y 5.19.

	DEFORMACIONES ULTIMAS			
	Dentro de zona de Plastificación		Fuera de la zona de Plastificación	
	Compresion	Traccion	Compresion	Traccion
Acero	-	0.01	-	0.0036
Concreto Simple	0.0021	-	0.0021	-
Concreto Confinado	0.0065	-	0.0065	-



a) Deformaciones valores máximos en muros

b) Zona de plastificación

Figura 5.18: Deformaciones máximas en muros (Powell G., 2007).

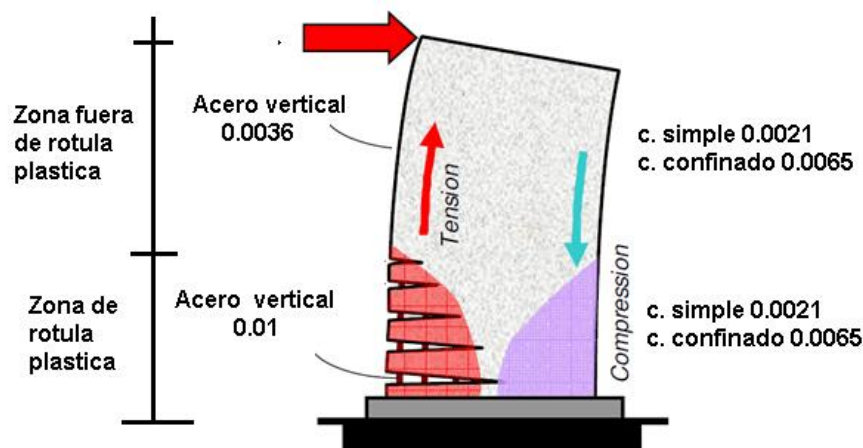


Figura 5.19: Control de deformaciones en muros (adaptado de http://www.iitgn.ac.in/seismic-design/files/ShearWall_IS13920_1993-DCR).

5.5 Comportamiento estructural de la edificación sin disipador

La evaluación del comportamiento estructural se hizo mediante una análisis tiempo-historia usando los registros de la Tabla 5.3 escalados a 0.5 PGA en sentidos H1 y H2. El cálculo de las deformaciones límites PERFORM 3D lo resume en una gráfica (Fig. 5.20 y 5.21), donde grafica valores de deformaciones y rotaciones para diferentes aceleraciones; los valores que han excedido los límites permisibles (última columna de la tabla 5.4 y valores de la figura 5.18a) están por encima de la línea roja que tiene el valor de 1.0.

El análisis en dirección H1 (Fig. 5.20) muestra que ninguna deformación y rotación ha superado los límites permisibles en ningún elemento, el valor máximo alcanzado es por fuerza de corte en el muro PL-04 llegando a $0.9 \cdot V_n$.

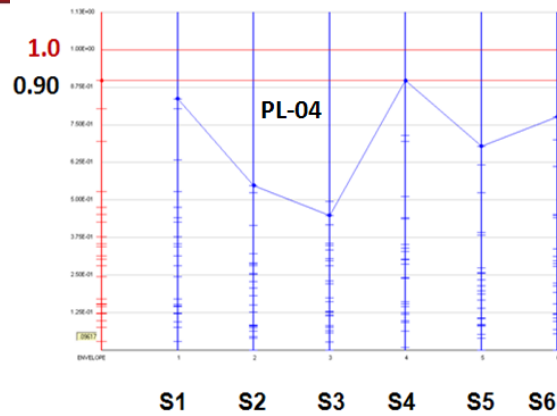
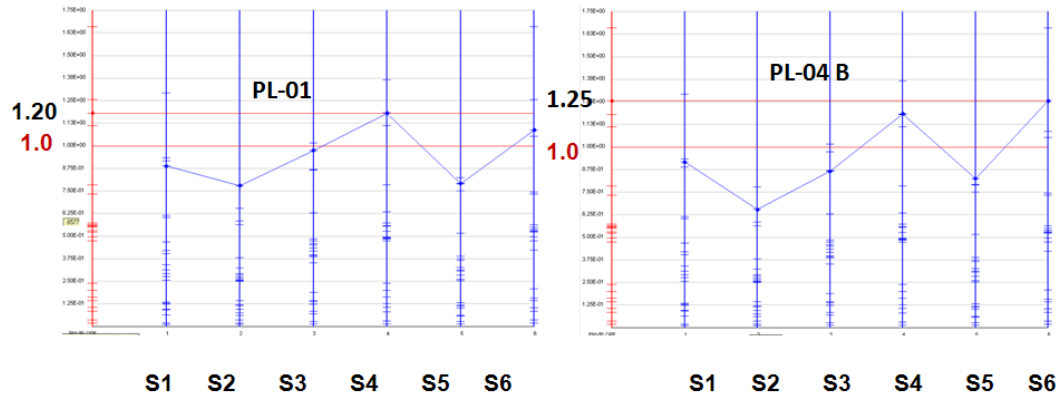
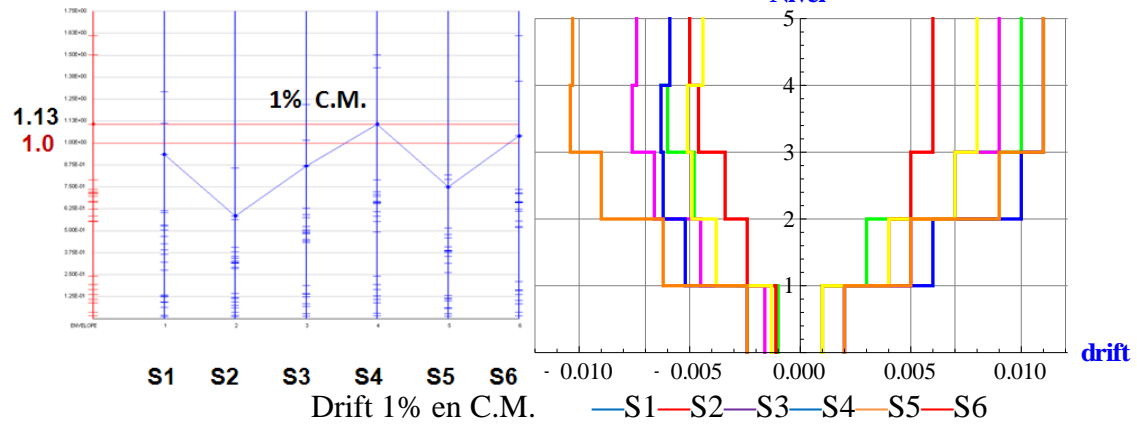


Figura 5.20: Deformaciones limites en H1.

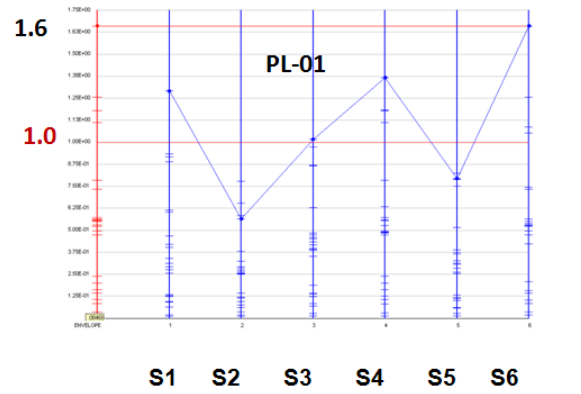


Vn en PL-01

Vn en PL-04b



Drift 1% en C.M.



Deformación del acero fuera de rotulas plástica

Figura 5.21: Deformaciones limites en H2.

En la Fig. 5.21 para S6 la deformación del acero ha superado 1.6 veces lo permitido ($0.0058=1.4 \times 0.0036$) en los pisos 2 y 3 (Fig. 5.22), la resistencia al corte ha sido superada en PL-01 y PL-04a, por ejemplo para PL-01 ha sido en $1.2 V_n = 208 \text{ ton-f}$ en S4; donde el valor calculado de V_n es de 173.6 ton-f (Fig.5.17). En cuanto al valor del drift en el C.M. ha superado el nivel del 1% pero este valor no es crítico, el valor máximo es 2 % (colapso estructural) del cual está muy por debajo.

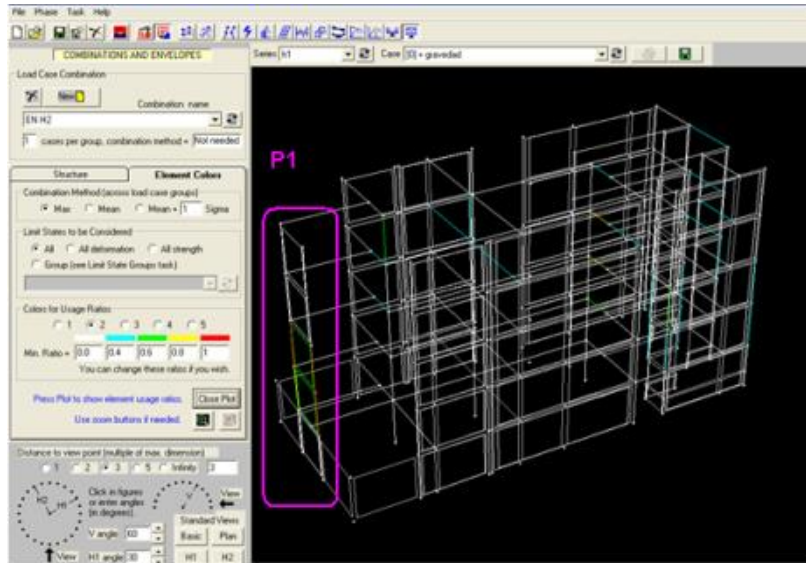


Figura 5.22: Deformaciones en el acero excedidas en PL-01 para S6 en sentido H2



Figura 5.23: Deformaciones limites en H2 con señal sintética.

En la Fig. 5.23 se analizó en el sentido H2 con la señal sintética para mostrar el comportamiento de la edificación frente a un sismo de acuerdo a la norma, se verificó que presenta unas sollicitaciones un poco menores que a todos los sismos analizados.

Las deformaciones límites de rotación en vigas, columnas y Drift (2%) ante un sismo severo no superan los valores máximos de LS y CP (dos últimas columnas de la Tabla 5.4) excepto el Drift de 1% en H2. Como la estructura ya está construida y no se pueden cambiar dimensiones y acero de refuerzo, se buscara con la adición de disipadores tipo ADAS disminuir las deformaciones que han excedido los valores permisibles, en la figura 5.24 se muestra la distribución de la energía de entrada (E_I) para los sismos que causan las mayores sollicitaciones (S1, S4 y S6).

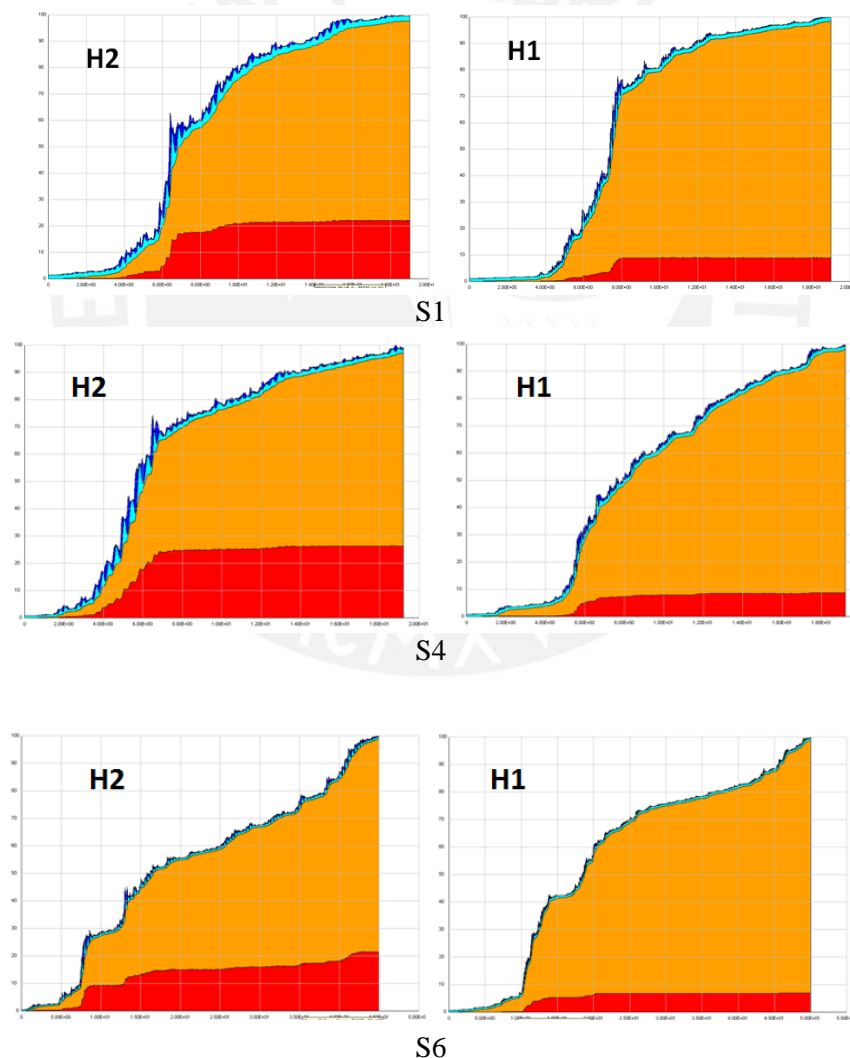


Figura 5.24: Distribución de la energía de entrada E_I : Donde E_h (rojo), E_v (naranja), E_k (azul) y E_s (celeste).

5.6 Reforzamiento estructural con disipadores ADAS

El diseño de disipadores se hizo en forma iterativa mediante corridas sucesivas hasta lograr bajar las deformaciones en los elementos que excedían, una vez que se cumple las condiciones (Fig. 5.25) el proceso queda terminada.

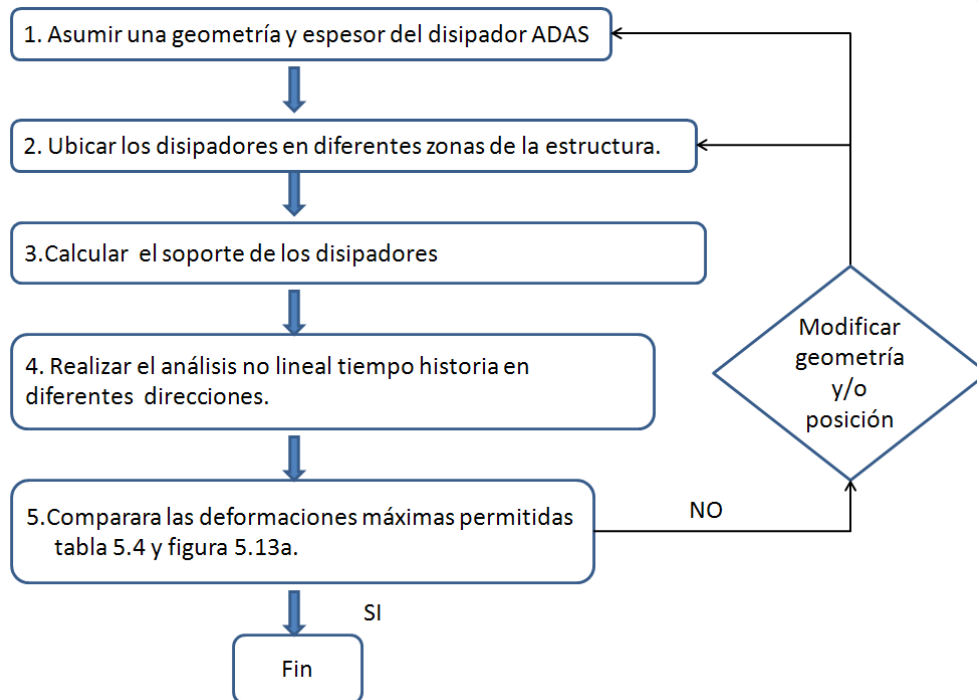


Figura 5.25: Secuencia de diseño de disipador ADAS.

5.6.1 Reforzamiento en H2.

Se reforzaron los ejes C y D (Fig. 5.26), dicho reforzamiento debe ser cercano al muro PL-01 que es el elemento al que se desea disminuir sus solicitaciones, después de varias iteraciones se obtuvo dos secciones de disipadores para el eje C y D Fig. 5.27.

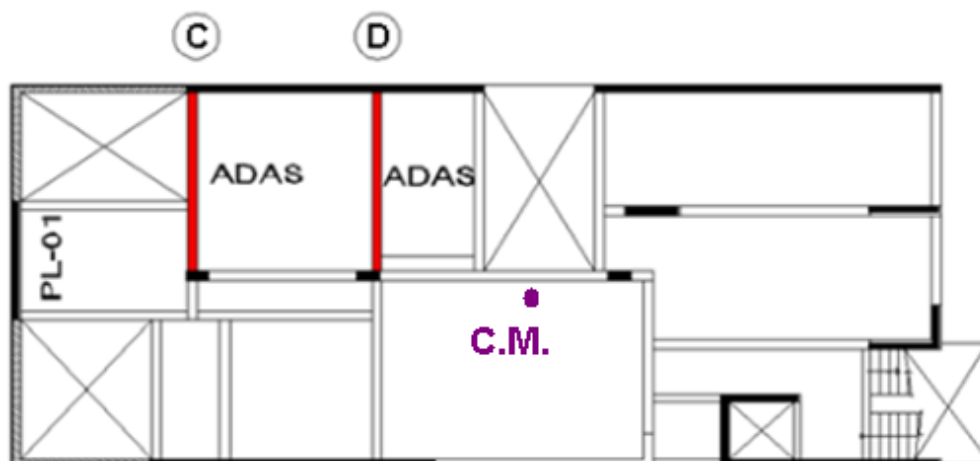


Figura 5.26: Zona a reforzamiento con disipador ADAS sentido H2.

El soporte de disipadores es un sistema Chevrom donde el perfil calculado es el tipo W12x30, que será utilizado para todos los refuerzos; se verifico su sección usando las propiedades del disipador más fuerte (Tabla 5.5) y se muestra a continuación.

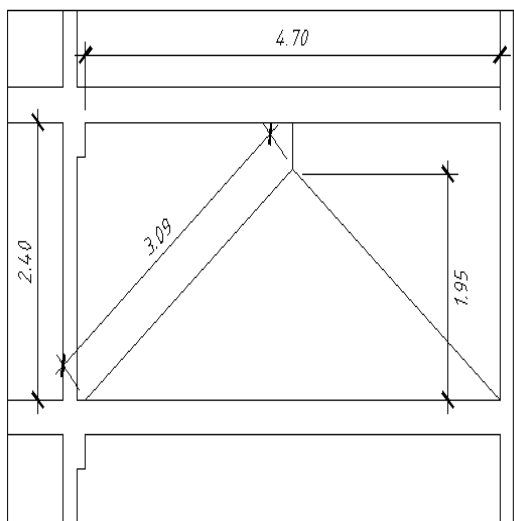
Tabla 5.5 Propiedades para disipador ADAS de 7 placas en eje D.

SISTEMA INGLES		PROPIEDADES SI			
b (in)	7.5	L (mm)	381	(15")	
E (ksi)	30000	e (mm)	25.4	(1")	
L (in)	15	σ (Mpa)	289.58	(42 ksi)	
e (ksi)	1	n	7	# placas	
σ (ksi)	42				
n	7				

Valores característicos (Fig. 3.3a)				
	pulgadas	m		
Δy ADAS	0.24	0.0060	Mp (kip-in)	78.75
ΔPL	0.16	0.0040	Me (kip-in)	52.5
Δmax	2.13	0.0540		

Fuerzas de cedencia para diferentes # placas				
	1 placa	4 placas	5 placas	7 placas
V_p (kip)	10.5	42	52.5	73.5
K_e (kip/in)	44.44	177.78	222.22	311.11

Fuerza y Rigidez para disipador con 7 placas			
V_p	33338.87	Kg-f	326720.9 N
K_e	5555783.03	kg-f/m	54446.67 N/mm
3.50%	194452.41	Kg-f/m	1905.63 N/mm



Verificación de soporte

$E_a := 200055.7 \text{ MPa} \quad (2040000 \text{ kg-f/cm}^2)$

$\gamma_a := 39.68 \cdot \frac{\pi}{180}$

$V_p := 326720.9 \text{ N}$

$\sigma_y := 289.6 \text{ MPa} \quad (42 \text{ ksi})$

$L_s := 3100 \text{ mm}$

$A_s := 5690 \text{ mm}^2 \quad \text{para un perfil W12x30}$

$$A_{min} := \frac{V_p}{(\cos(\gamma a) \cdot \sigma_y)} \quad (\text{ecuacion 3.17})$$

$$A_{min} = 1.466 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$K_b := \frac{2 \cdot E_a \cdot A_s \cdot (\cos(\gamma a))^2}{L_s} \quad (\text{ecuacion 3.15})$$

$$K_b = 4.35 \times 10^5 \text{ N/mm}$$

$$K_{min} := \frac{2 \cdot V_p \cdot E_a \cdot \cos(\gamma a)}{\sigma_y \cdot L_s} \quad (\text{ecuacion 3.18})$$

$$K_{min} = 1.121 \times 10^5 \text{ N/mm} \quad +$$

$$A_s > A_{min} \quad \text{OK}$$

$$K_b > K_{min} \quad \text{OK}$$

Los desplazamientos del C.M. (centro de masas) y PL-01 varían de acuerdo a cada registro, se demuestra una reducción de desplazamientos laterales cuando se colocan los disipadores ADAS Tabla 5.6 y 5.7 Fig. 5.28 y 5.29. En general la disminución de desplazamientos en el C.M. es mínima excepto en el sismo S4 (sismo 7039) donde llega al **32 y 53%**, pero si es considerable en PL-01 para todos los registros Fig. 5.30.

De las Fig. 5.28 y 5.29 se observa que los desplazamientos producidos por el sismo sintético son consistentes y cercanos a los valores máximos, también se aprecia que los desplazamientos negativos presentan mayor dispersión con una desviación estándar (σ) mayor que en sentido positivo.

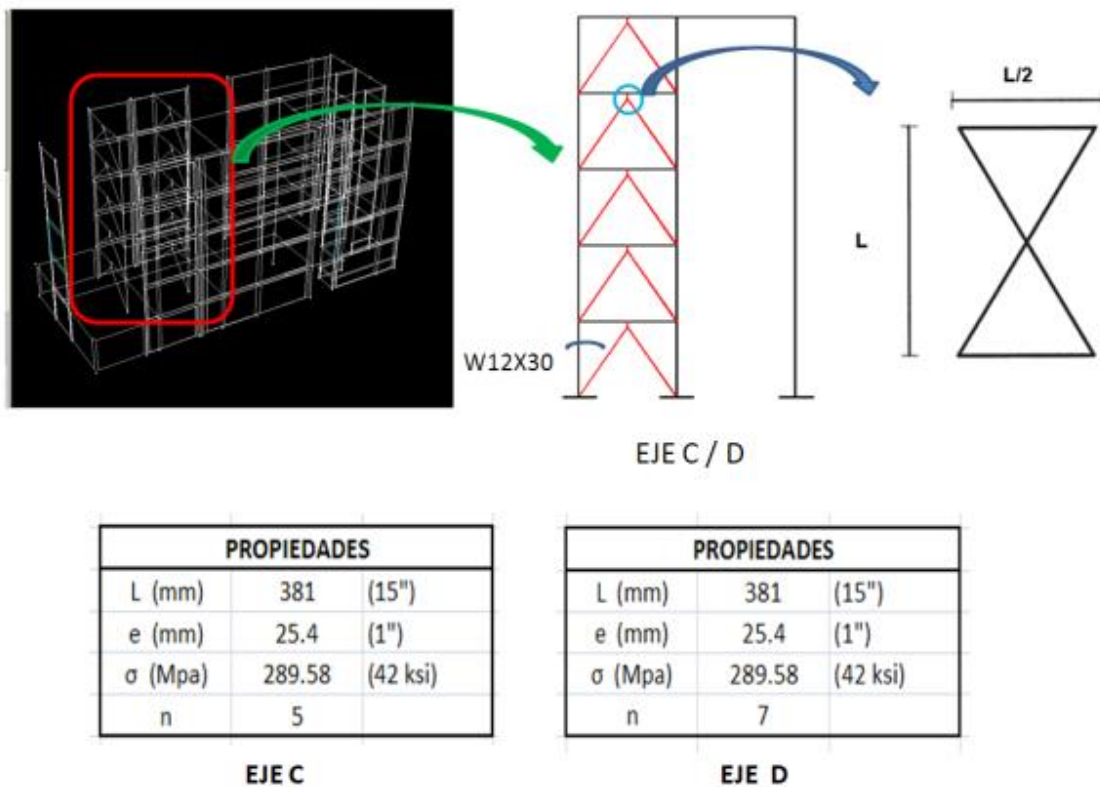


Figura 5.27: Reforzamiento y dimensiones finales de disipadores ADAS en ejes C y D.

Tabla 5.6: Desplazamientos laterales en centro de masa (C.M.) sentido H2.

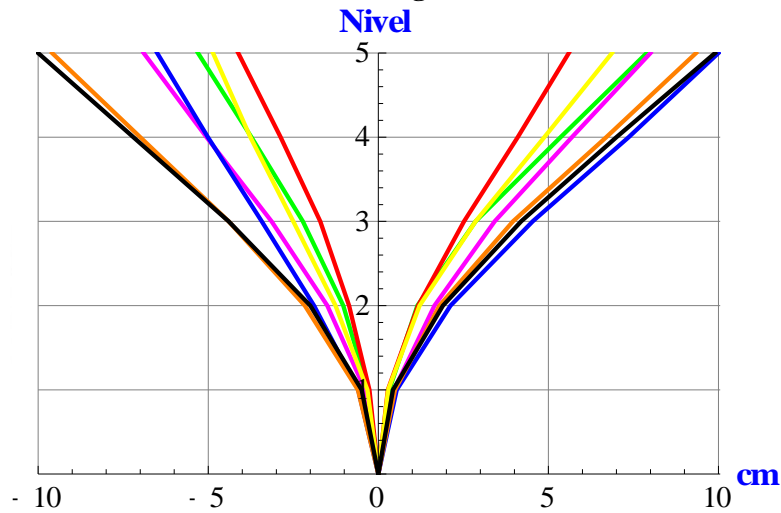
Desplazamientos (cm) - ORIGINAL											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	Promedio	σ	Promedio + σ	Promedio - σ
5	7.89	5.60	8.01	10.03	6.87	9.35	9.90	8.23	1.64	9.88	6.59
4	5.36	4.09	5.69	7.36	4.88	6.69	7.07	5.88	1.21	7.09	4.67
3	2.87	2.52	3.42	4.54	2.86	3.96	4.20	3.48	0.77	4.25	2.71
2	1.15	1.17	1.65	2.13	1.22	1.81	1.87	1.57	0.39	1.96	1.18
1	0.33	0.28	0.46	0.54	0.29	0.49	0.43	0.40	0.10	0.51	0.30
Sentido Negativo (σ = desviación estándar)											
5	5.31	4.12	6.91	6.49	4.86	9.59	10.00	6.75	2.28	9.04	4.47
4	3.73	2.87	5.05	5.01	3.76	7.02	7.21	4.95	1.67	6.62	3.28
3	2.23	1.71	3.15	3.43	2.49	4.41	4.38	3.11	1.04	4.16	2.07
2	1.03	0.86	1.51	1.89	1.26	2.16	2.01	1.53	0.50	2.04	1.03
1	0.31	0.26	0.39	0.60	0.32	0.60	0.49	0.43	0.14	0.57	0.29
Desplazamientos (cm) - ADAS											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	Promedio	σ	Promedio + σ	Promedio - σ
5	7.70	5.54	5.49	4.68	5.25	8.66	7.64	6.42	1.54	7.96	4.89
4	5.56	4.17	4.12	3.61	3.99	6.53	5.84	4.83	1.12	5.95	3.71
3	3.42	2.72	2.73	2.42	2.65	4.20	3.85	3.14	0.69	3.83	2.46
2	1.68	1.32	1.47	1.30	1.47	2.09	1.94	1.61	0.31	1.91	1.30
1	0.54	0.40	0.48	0.46	0.46	0.55	0.51	0.48	0.05	0.54	0.43
Sentido Negativo (σ = desviación estándar)											
5	4.12	4.32	4.08	4.40	3.87	4.53	8.20	4.79	1.52	6.31	3.27
4	3.13	3.37	3.37	3.43	3.11	3.49	6.21	3.73	1.10	4.83	2.63
3	2.27	2.41	2.45	2.33	1.22	2.49	4.07	2.46	0.84	3.30	1.63
2	1.42	1.41	1.42	1.27	0.57	1.45	2.07	1.37	0.44	1.81	0.94
1	0.52	0.46	0.49	0.41	0.13	0.54	0.60	0.45	0.15	0.60	0.30

Tabla 5.7: Desplazamientos laterales en PL-01 sentido H2.

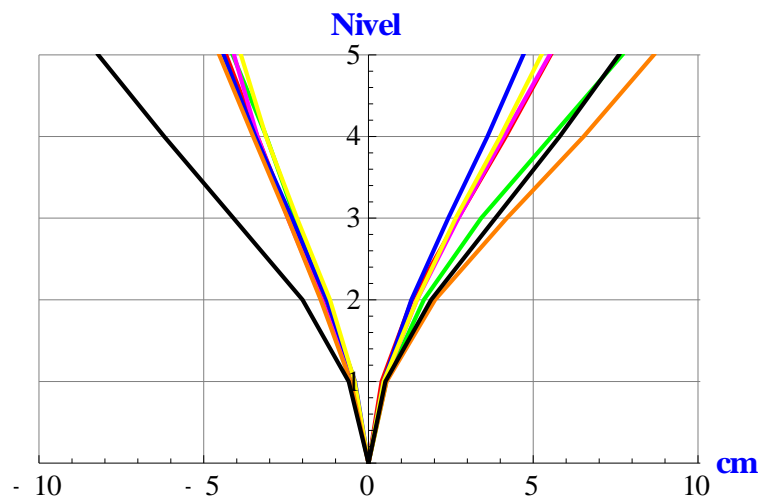
Desplazamientos (cm) - ORIGINAL											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	Promedio	σ	Promedio + σ	Promedio - σ
5	7.25	5.39	6.88	9.54	6.18	9.26	9.10	7.66	1.65	9.30	6.01
4	4.73	3.78	4.66	6.71	4.20	6.26	6.21	5.22	1.15	6.37	4.07
3	2.32	2.15	2.59	3.82	2.25	3.24	3.37	2.82	0.65	3.47	2.17
2	0.91	0.82	1.07	1.46	0.81	1.24	1.22	1.08	0.24	1.32	0.83
1	0.15	0.10	0.16	0.19	0.10	0.16	0.13	0.14	0.03	0.17	0.11
Sentido Negativo											
5	4.49	3.66	6.34	6.05	4.47	8.32	9.09	6.06	2.05	8.11	4.01
4	3.04	2.44	4.48	4.53	3.33	5.96	6.37	4.31	1.48	5.78	2.83
3	1.72	1.49	2.62	2.90	2.09	3.53	3.64	2.57	0.85	3.42	1.72
2	0.78	0.72	1.13	1.41	0.94	1.53	1.45	1.14	0.33	1.47	0.80
1	0.14	0.12	0.18	0.26	0.13	0.25	0.19	0.18	0.06	0.24	0.13

Desplazamientos (cm) - ADAS											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	Promedio	σ	Promedio + σ	Promedio - σ
5	4.43	2.87	3.02	2.62	3.39	5.50	4.91	3.82	1.12	4.94	2.70
4	3.11	2.17	2.21	2.08	2.39	4.03	3.59	2.80	0.78	3.58	2.02
3	1.84	1.31	1.51	1.44	1.45	2.43	2.18	1.74	0.43	2.16	1.31
2	0.86	0.60	0.74	0.77	0.70	1.02	0.91	0.80	0.14	0.94	0.66
1	0.19	0.14	0.15	0.17	0.14	0.16	0.13	0.15	0.02	0.17	0.13
Sentido Negativo											
5	2.21	2.64	2.63	2.50	2.54	2.62	5.02	2.88	0.96	3.84	1.92
4	1.72	2.13	2.14	1.89	1.90	2.00	3.81	2.23	0.71	2.94	1.51
3	1.37	1.50	1.49	1.22	1.28	1.37	2.42	1.52	0.41	1.93	1.11
2	0.82	0.79	0.76	0.57	0.66	0.72	1.11	0.78	0.17	0.95	0.61
1	0.82	0.16	0.18	0.13	0.14	0.17	0.20	0.26	0.25	0.51	0.01

C.M.- Original



C.M.- ADAS



—S1—S2—S3—S4—S5—S6—Sintético

Figura 5.28: Desplazamientos laterales del C.M en H2.

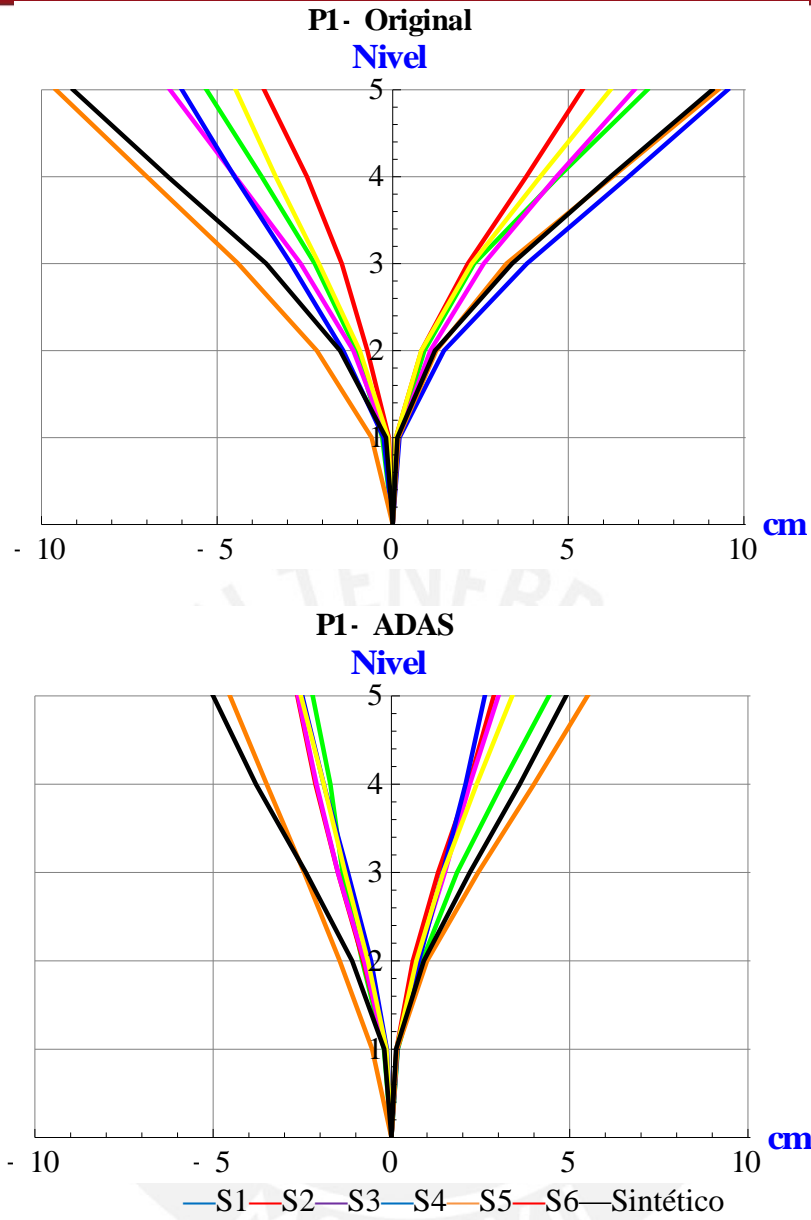
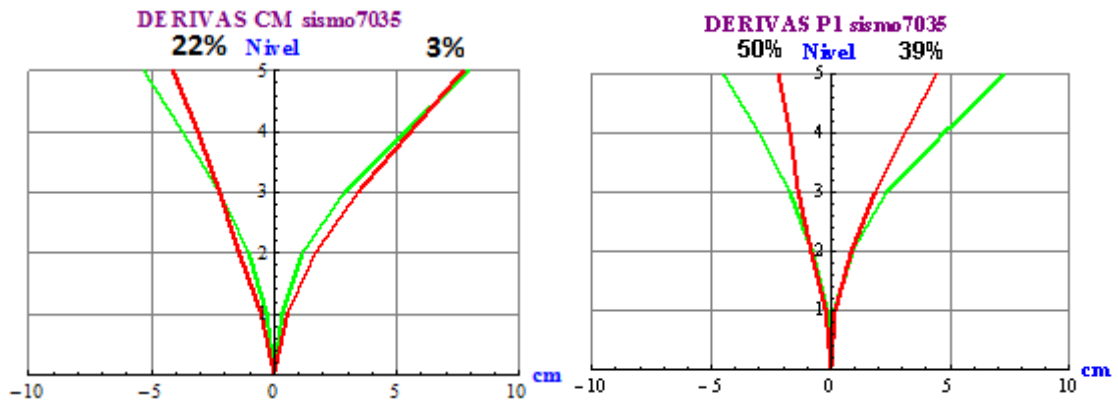
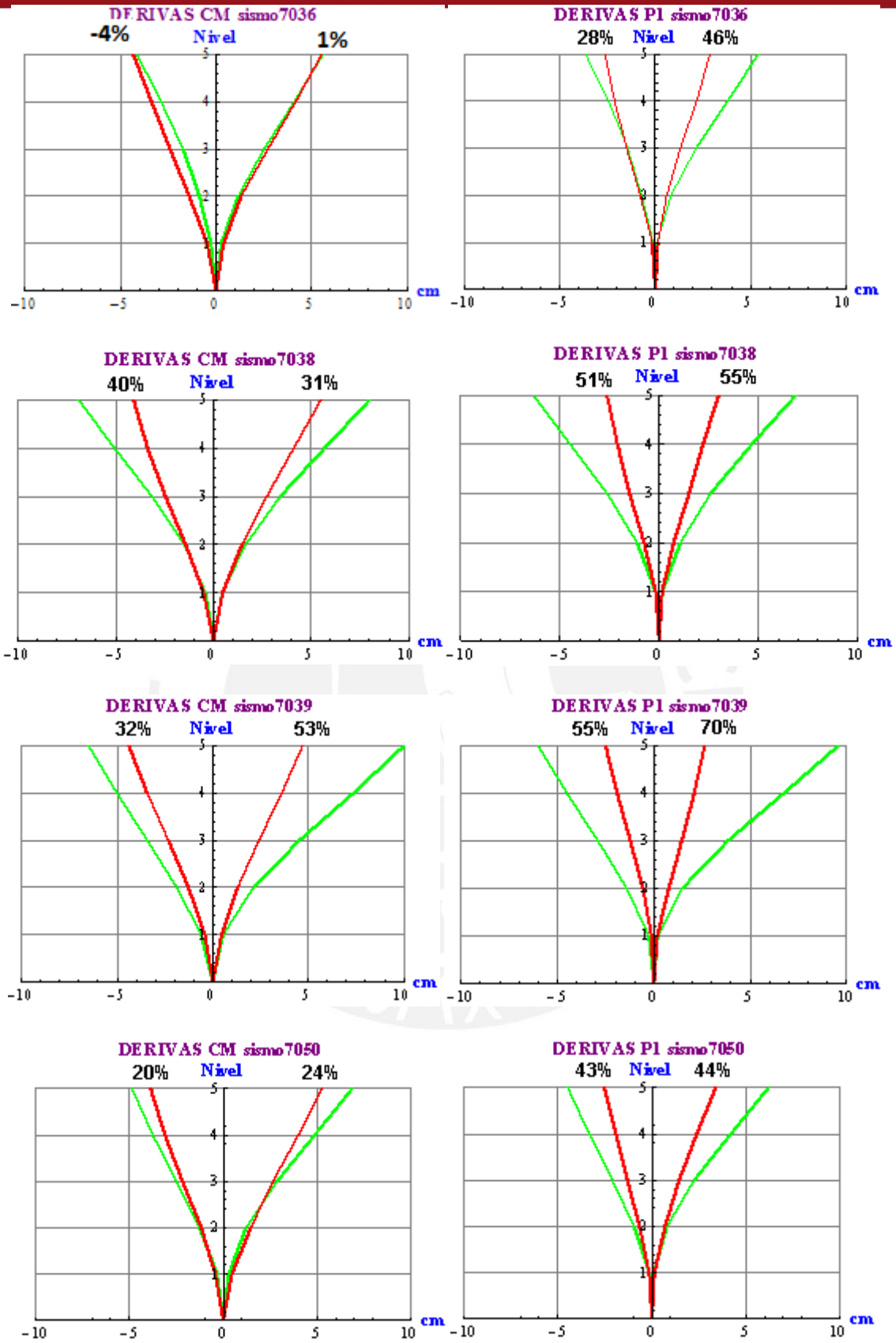


Figura 5.29: Desplazamientos laterales de PL-01 en H2.





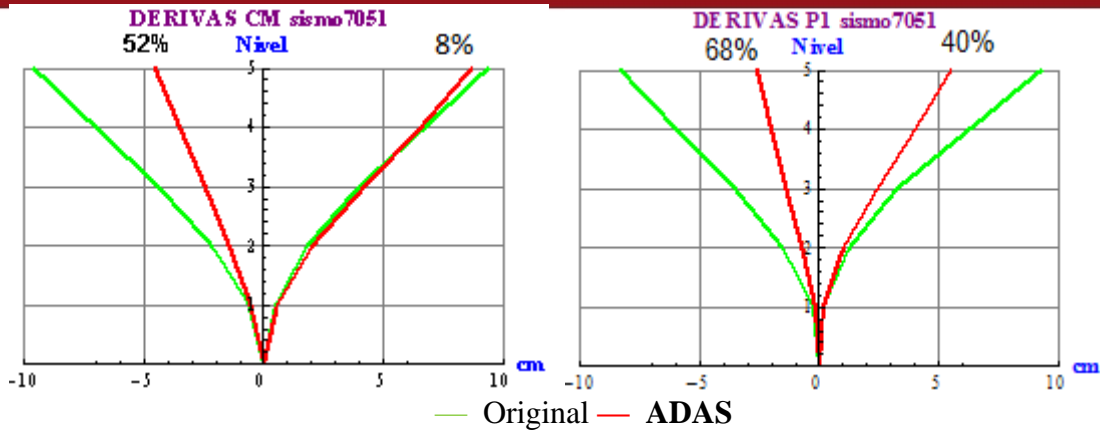


Figura 5.30: Comparación de desplazamientos laterales del C.M. y PL-01 en H2.

Con la adición de disipadores ADAS se ha logrado reducir las deformaciones que excedían los valores permisibles (Fig. 5.31), la única excepción es la fuerza por corte en PL-04b llega a 1.14Vn solo en S6; en los demás sismos el valor es menor que 1.

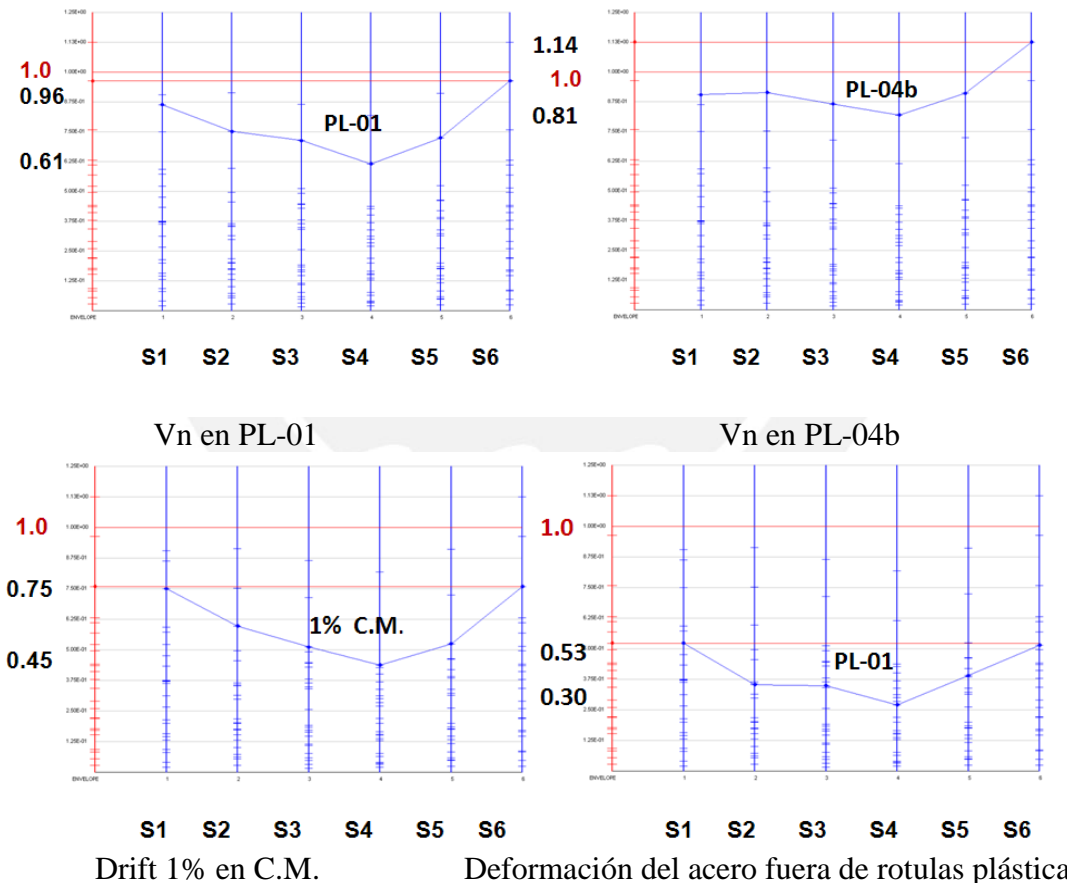


Figura 5.31: Reducción de solicitaciones en dirección H2.

Los disipadores en el ejes D muestran un mejor comportamiento histerético que en el eje C en todas las señales usadas, su eficiencia es mayor en los pisos superiores debido a que hay mayores deformaciones Fig. 5.32.

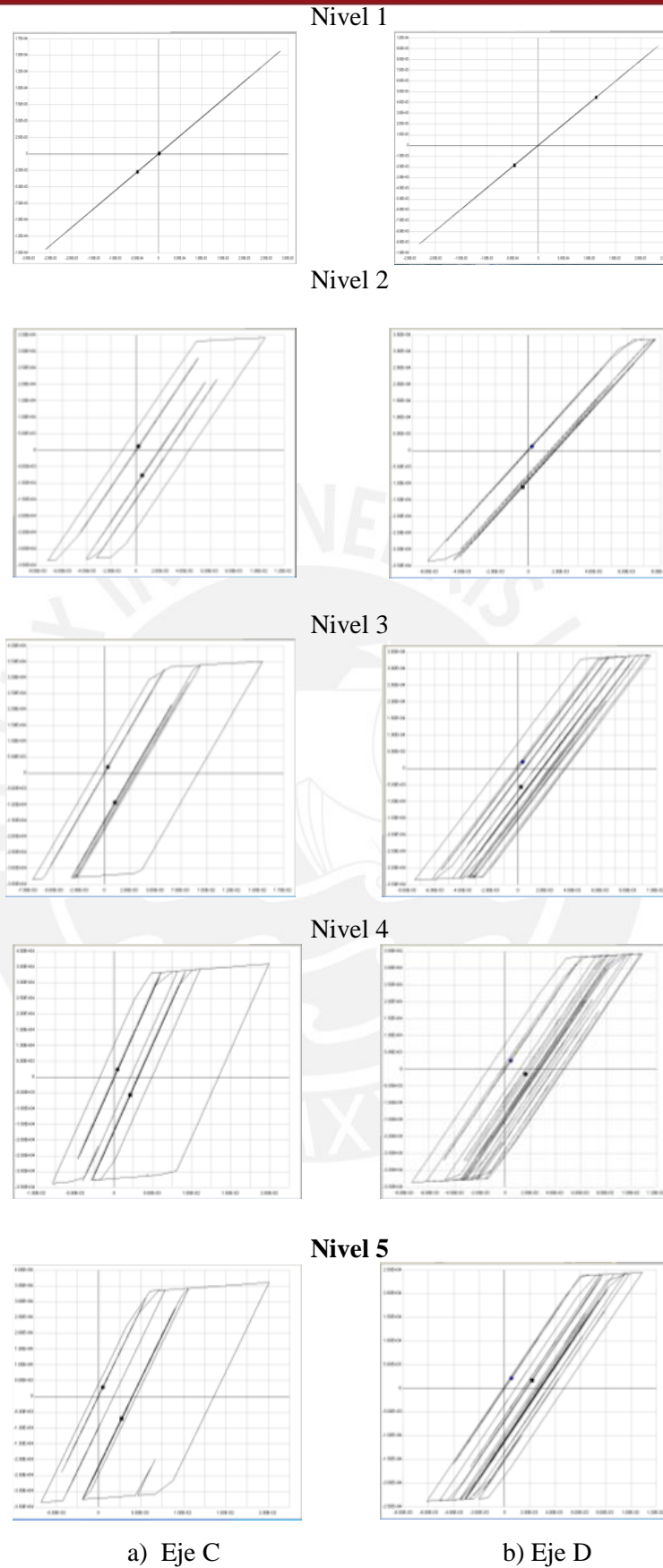


Figura 5.32: Comportamiento de disipadores en dirección H2 para S6.

5.6.2 Reforzamiento en H1.

El sentido H1 es el sentido más rígido debido a que tiene bastantes muros de concreto con desplazamientos laterales menores en comparación con los del sentido H2, según la figura 5.20 no sobrepasa ninguna deformación límite por lo tanto el refuerzo estructural no es necesario. El elemento que tiene más sollicitación es el muro PL-04, en general los desplazamientos laterales son reducidos y muy similares en el C.M (centro de masa) y en el muro PL-04 como se muestra en la tabla 5.8 y figura 5.33.

Tabla 5.8: Desplazamientos laterales en centro de masa (C.M.) sentido H1.

Desplazamientos laterales (cm) - ORIGINAL											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	promedio	σ	promedio + σ	promedio - σ
5	2.18	1.83	1.86	2.57	1.92	2.03	2.52	2.13	0.31	2.44	1.82
4	1.66	1.41	1.44	1.96	1.48	1.54	1.91	1.63	0.23	1.85	1.40
3	1.10	0.96	0.99	1.31	1.03	1.02	1.28	1.10	0.14	1.24	0.95
2	0.57	0.52	0.54	0.69	0.56	0.53	0.67	0.58	0.07	0.65	0.52
1	0.17	0.16	0.17	0.21	0.18	0.16	0.20	0.18	0.02	0.20	0.16
Sentido Negativo											
5	2.37	2.49	1.77	1.94	1.72	2.40	2.50	2.17	0.35	2.52	1.82
4	1.77	1.88	1.32	1.49	1.31	1.82	1.89	1.64	0.26	1.90	1.38
3	1.14	1.24	0.89	1.01	0.88	1.22	1.25	1.09	0.16	1.25	0.93
2	0.61	0.65	0.48	0.55	0.47	0.65	0.65	0.64	0.13	0.76	0.51
1	0.19	0.19	0.15	0.17	0.14	0.20	0.19	0.18	0.02	0.20	0.15

Tabla 5.9: Desplazamientos laterales en PL-04 sentido H1.

Desplazamientos laterales (cm) - ORIGINAL											
Sentido Positivo (σ = desviación estándar)											
Nivel	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Sintético	promedio	σ	promedio + σ	promedio - σ
5	2.17	1.86	1.86	2.51	1.88	2.14	2.61	2.15	0.31	2.46	1.84
4	1.66	1.44	1.44	1.93	1.47	1.63	2.00	1.65	0.23	1.88	1.42
3	1.10	0.99	0.97	1.30	1.02	1.11	1.35	1.12	0.15	1.27	0.97
2	0.61	0.54	0.54	0.69	0.57	0.60	0.72	0.61	0.07	0.68	0.54
1	0.20	0.17	0.18	0.21	0.18	0.18	0.22	0.19	0.02	0.21	0.17
Sentido Negativo											
5	2.35	2.54	1.86	1.96	1.73	2.23	2.66	2.19	0.35	2.54	1.84
4	1.77	1.92	1.41	1.48	1.32	1.71	2.00	1.66	0.26	1.92	1.39
3	1.17	1.27	0.96	1.00	0.88	1.15	1.32	1.11	0.16	1.27	0.94
2	0.63	0.66	0.51	0.54	0.47	0.62	0.69	0.59	0.08	0.67	0.51
1	0.19	0.20	0.16	0.17	0.14	0.19	0.21	0.18	0.02	0.20	0.16

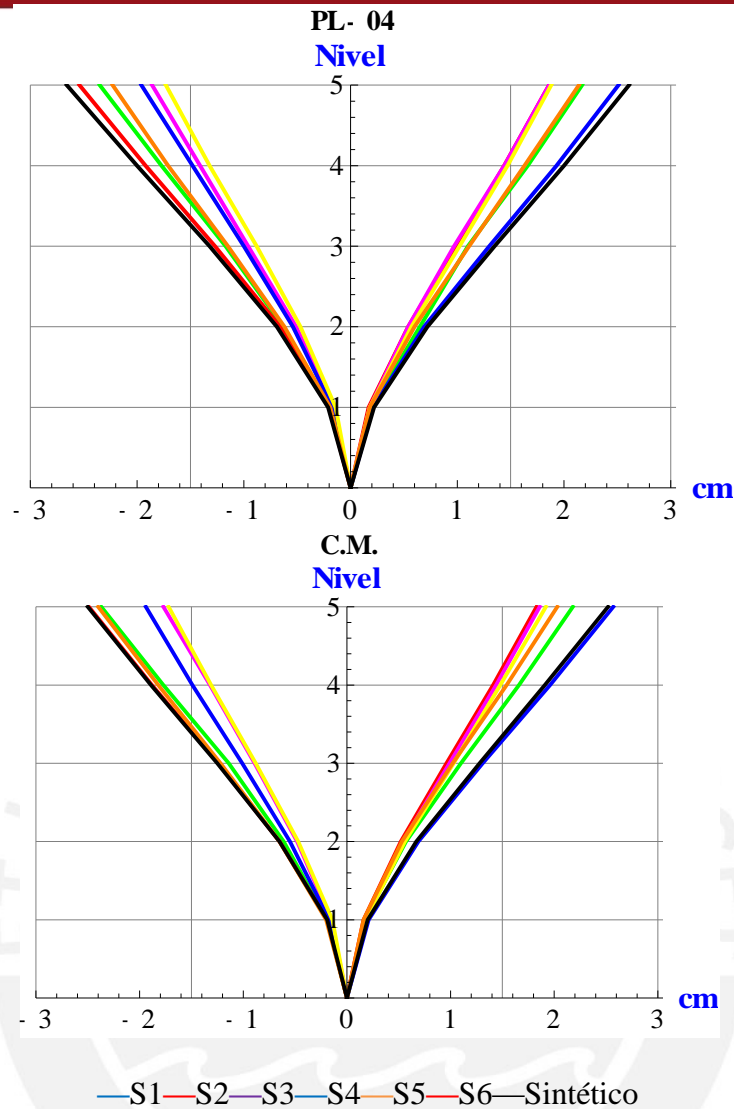


Figura 5.33: Comparación de desplazamientos laterales de PL-04 y C.M. en H1

5.6.3 Deformaciones y rotaciones finales máximas.

Con el reforzamiento de disipadores ADAS se logra reducir las rotaciones en los elementos estructurales (Tabla 5.10), las deformaciones del acero y concreto en los muros de concreto (Tabla 5.11); dichos valores corresponden a los máximos encontrados para los 6 sismos analizados y son menores a los máximos permisibles.

Los valores de fuerza cortante V_n solo ha sido superado en PL-04a en $1.14V_n$ para un solo sismo (S6) lo cual es aceptable.

Tabla 5.10: Comparación de rotaciones máximas.

Nivel de Desempeño (daño)	Reparable (LS)	No Colapso (CP)	H2	H1
Deformación en Columnas	$\theta \leq 0.01$	$\theta \leq 0.02$	$\theta = 0.0035$	$\theta = 0.003$
Deformación en Vigas	$\theta \leq 0.01$	$\theta \leq 0.025$	$\theta = 0.0075$	$\theta = 0.002$
Drift	0.01	0.02	0.0080 (C.M.)	0.0023 (C.M.)
Muro de concreto (rotaciones)	0.06	0.09	0.03	0.02

Tabla 5.11: Deformaciones máximas en el concreto y acero.

DEFORMACIONES ULTIMAS H2				
	Dentro de zona de Plastificación		Fuera de la zona de Plastificación	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción
Acero	-	0.0034	-	0.0019
Concreto Simple	0.000483	-	0.00034	-
Concreto Confinado	0.001495	-	0.00104	-
DEFORMACIONES ULTIMAS H1				
	Dentro de zona de Plastificación		Fuera de la zona de Plastificación	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción
Acero	-	0.0035	-	0.0018
Concreto Simple	0.00071	-	0.00056	-
Concreto Confinado	0.0022	-	0.001625	-

Finalmente se puede ver que la estructura es reparable frente a un sismo severo (PGA de 0.5g).

5.7 Modificación en la respuesta estructural

Con el refuerzo de disipadores se redujeron los periodos de la estructura, pero solo es apreciable en el primero modo Tabla 5.12.

Tabla 5.12: Comparación de periodos.

Modo	ORIGINAL Periodo (s)	ADAS Periodo (s)
1- (H2)	0.5116	0.452
2 -(Traslación)	0.2182	0.2069
3-(H1)	0.1733	0.173
4	0.1415	0.133
5	0.076	0.073
6	0.06	0.059
7	0.053	0.053
8	0.05	0.049
9	0.042	0.0407
10	0.032	0.032
11	0.029	0.029
12	0.024	0.024
13	0.022	0.022
14	0.021	0.021
15	0.018	0.018

Con la adición de disipadores ADAS se modifica la distribución de la energía de ingreso (E_I) Figs. 5.34.

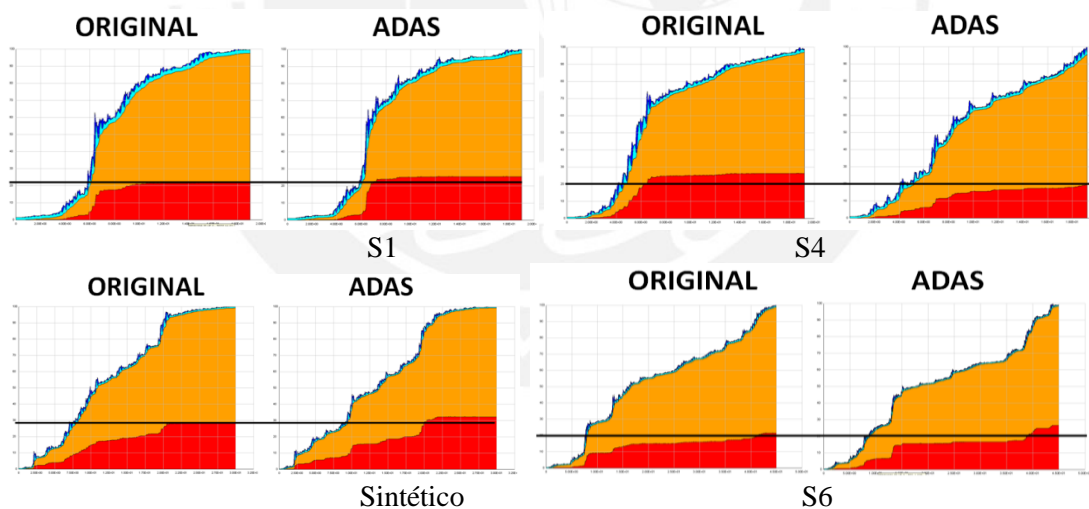


Figura 5.34: Distribución de la energía E_I en H2

El peso total de la edificación con 25% de carga viva es 983 ton-f, el aumento de la fuerza cortante con disipadores ADAS es mínimo y se da en sentido H2 como se muestran en las tablas 5.13, 5.14 y Fig. 5.35.

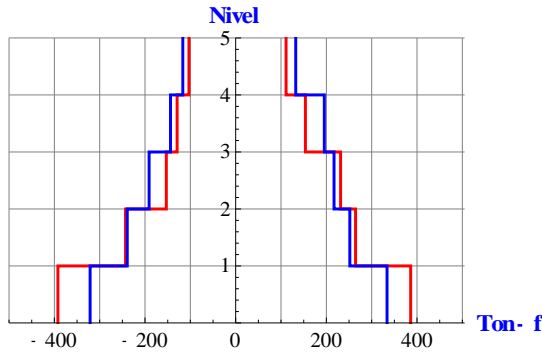
Tabla 5.13: Fuerza basal en H2 (sin ADAS).

	Nivel 1 (ton-f)		Nivel 2 (ton-f)		Nivel 3 (ton-f)		Nivel 4 (ton-f)		Nivel 5 (ton-f)	
	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.
SINTETICO	424.73	-397.89	336.57	-289.54	282.37	-258.65	210.22	-201.76	140.09	-135.00
S1	333.86	-321.21	251.82	-239.17	216.99	-191.01	195.44	-143.73	132.37	-116.55
S2	284.49	-269.73	225.59	-196.10	186.64	-172.23	148.81	-154.11	106.95	-97.92
S3	382.94	-377.45	295.21	-258.91	232.28	-206.95	178.75	-167.69	131.42	-119.19
S4	430.65	-493.58	339.03	-310.05	298.57	-221.62	211.49	-173.10	142.12	-117.75
S5	266.83	-309.83	215.79	-247.68	206.20	-182.86	165.79	-141.85	115.76	-102.29
S6	387.72	-498.50	322.08	-337.26	279.64	-290.30	201.39	-214.67	131.39	-138.30

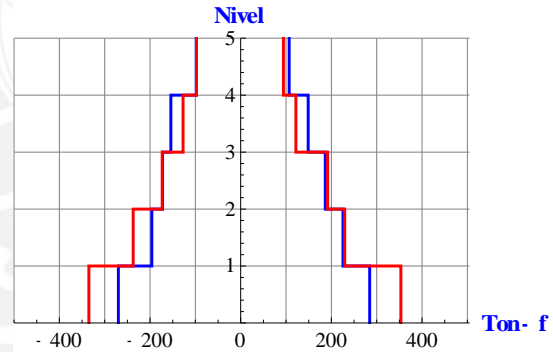
Tabla 5.14: Fuerza basal en H2 con ADAS.

	Nivel 1 (ton-f)		Nivel 2 (ton-f)		Nivel 3 (ton-f)		Nivel 4 (ton-f)		Nivel 5 (ton-f)	
	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.
SINTETICO	425.76	-399.60	283.15	-264.23	233.15	-197.12	173.13	-172.52	118.53	-124.78
S1	386.22	-392.16	264.42	-242.98	231.49	-152.90	153.86	-129.17	111.05	-103.11
S2	353.42	-334.82	229.61	-237.15	191.80	-173.17	121.72	-127.05	94.27	-97.51
S3	371.93	-360.71	249.75	-244.58	189.15	-182.20	131.60	-117.57	107.40	-96.93
S4	361.26	-330.31	219.18	-217.12	166.44	-166.35	116.71	-113.23	90.97	-90.71
S5	373.10	-324.71	254.67	-231.66	180.68	-155.53	131.01	-126.12	100.01	-94.51
S6	425.80	-409.25	308.79	-251.15	255.27	-186.30	157.29	-148.80	112.94	-97.98

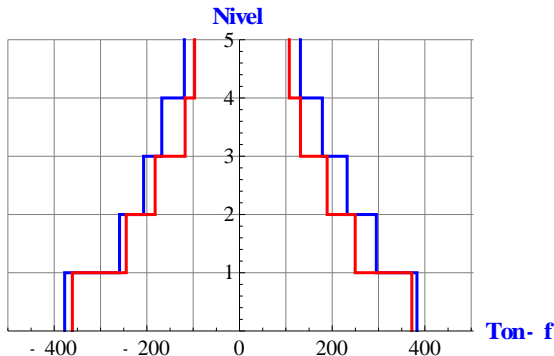
FUERZA CORTANTE S1



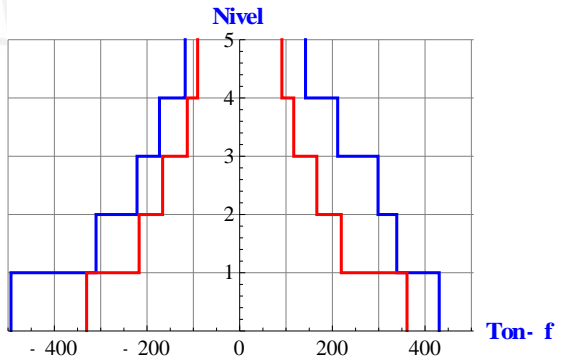
FUERZA CORTANTE S2



FUERZA CORTANTE S3



FUERZA CORTANTE S4



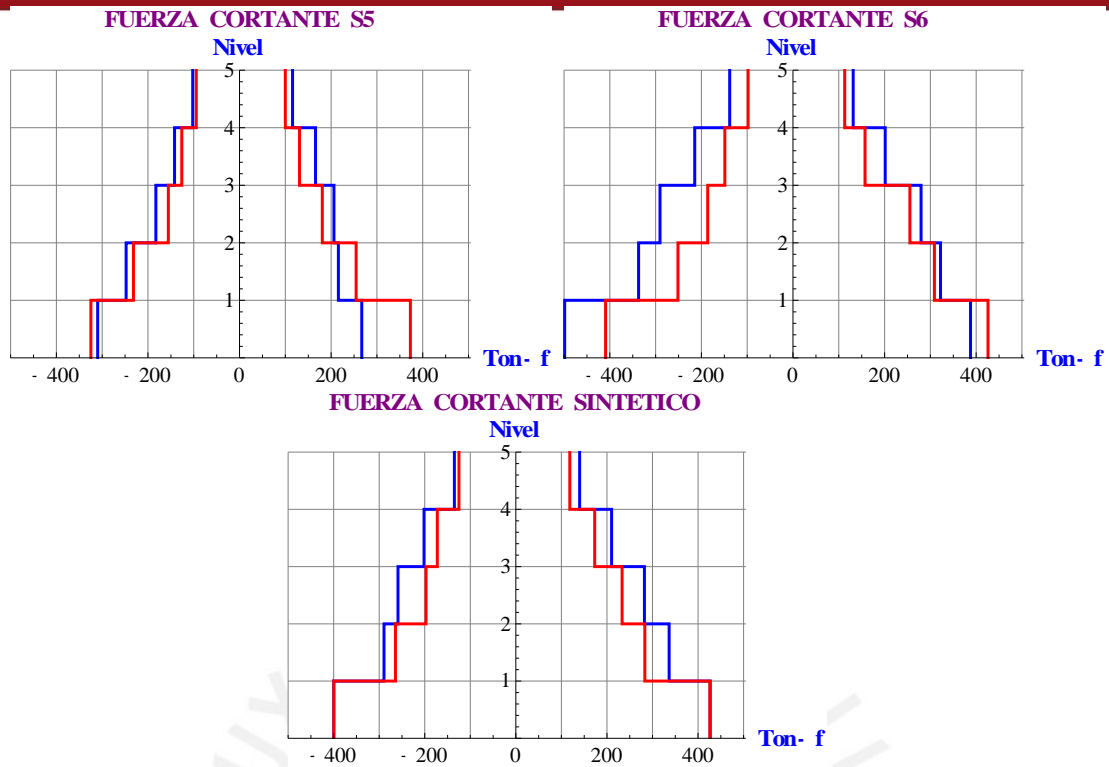
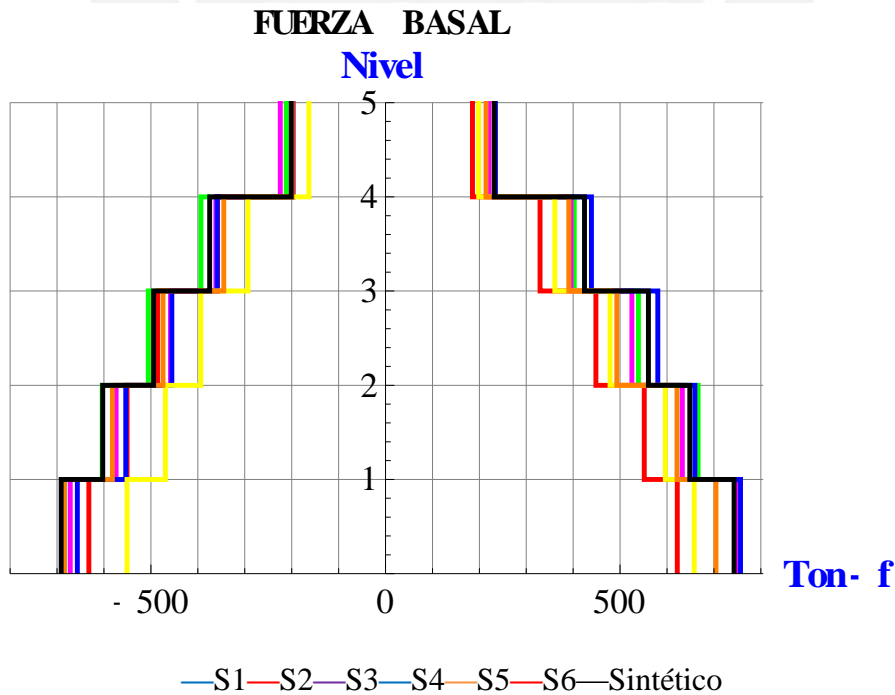


Figura 5.35: Distribución fuerza cortante (ton-f) en H2. —Original—ADAS

La fuerza basal en H1 se muestra en la figura 5.36 y Tabla 5.15, se puede apreciar que es mayor que en H2 debido a que hay poca disipación de energía.



—S1—S2—S3—S4—S5—S6—Sintético
Figura 5.36: Distribución fuerza cortante (ton-f) en H1.

Tabla 5.15: Fuerza basal en H1.

	Nivel 1 (ton-f)		Nivel 2 (ton-f)		Nivel 3 (ton-f)		Nivel 4 (ton-f)		Nivel 5 (ton-f)	
	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.
SINTETICO	742.75	-691.18	648.54	-602.69	560.16	-493.93	424.22	-374.73	231.72	-200.85
S1	749.64	-684.18	666.00	-603.57	538.89	-505.58	402.09	-393.40	231.91	-211.50
S2	621.92	-632.05	551.25	-550.89	448.42	-485.72	329.21	-357.98	185.37	-196.54
S3	749.12	-671.65	632.77	-574.17	525.26	-458.25	395.22	-361.63	220.34	-224.09
S4	756.67	-656.71	659.41	-553.38	580.33	-455.26	438.74	-358.63	234.14	-198.16
S5	657.96	-550.94	596.34	-469.10	478.47	-393.81	360.81	-292.90	198.52	-163.06
S6	704.31	-684.70	621.07	-581.96	492.92	-474.13	390.75	-344.56	214.26	-198.97

El amortiguamiento viscoso equivalente Perform 3D lo calcula en forma aproximada en base a los puntos máximos de energía de deformación, para ello solo hay que contar en un cierto intervalo de tiempo (donde ocurre los desplazamientos máximos) cuantos puntos “N” máximos de energía de deformación (color celeste) hay en la gráfica de distribución de la energía como se muestra en la figura 5.37.

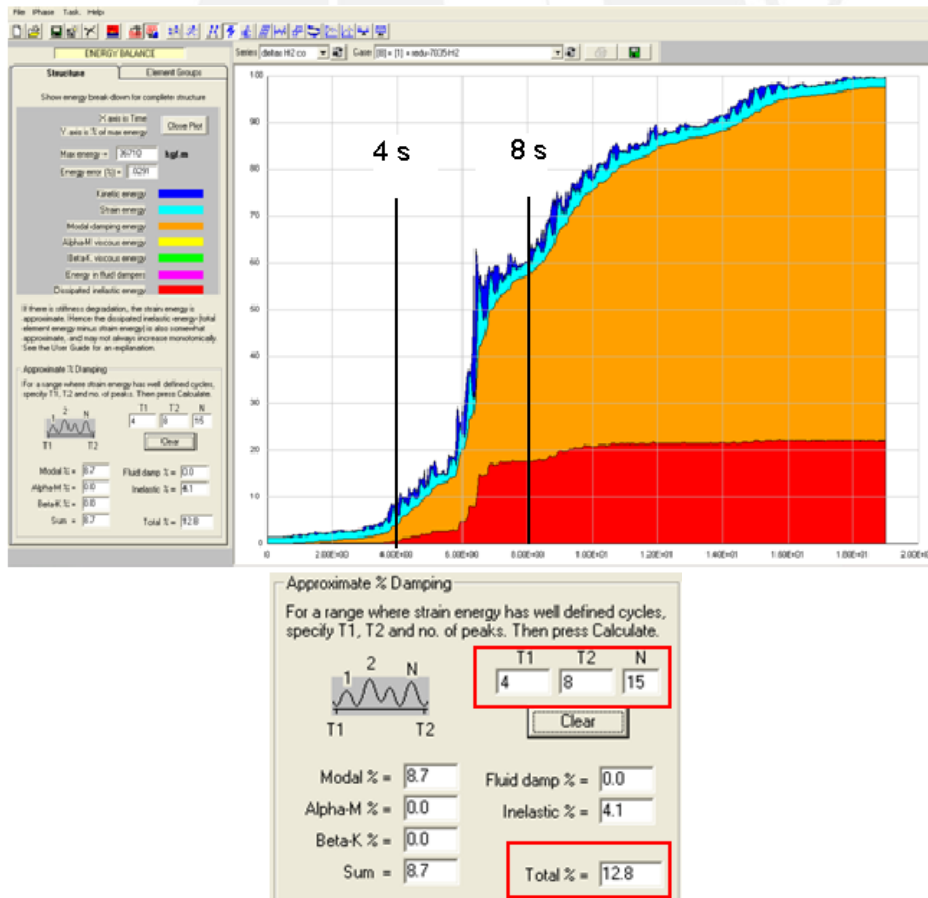


Figura 5.37: Cálculo aproximado de amortiguamiento viscoso equivalente-Perform-3d

Con la incorporación de disipadores ADAS aumenta el amortiguamiento viscoso equivalente, pero solo se refleja en sentido H2 como se muestra en la tabla 5.16.

Tabla 5.16: Comparación de amortiguamiento equivalente.

	ξ en H2			ξ en H1		
	ORIGINAL	ADAS	% Aumento	ORIGINAL	ADAS	% Aumento
S1	12.8	13.7	7.03	7.3	7.9	8.22
S2	11.9	12.4	4.20	6.3	6.9	9.52
S3	9.5	10.3	8.42	6.1	6.6	8.20
S4	11.5	11.4	-0.87	6.4	6.6	3.12
S5	10.3	11.9	15.53	6	6	0.00
S6	8.5	10.6	24.71	6	6	0.00
Sintético	12.3	13.4	8.94	7.2	7.5	4.17

5.8 Implementación de disipadores

El material de las placas del disipador será el acero estructural A36 con propiedades “nominales” de F_y y F_u de 36 y 58 ksi (2,530 y 4,080 kg-f/cm²) mostrado en la Fig. 5.42.

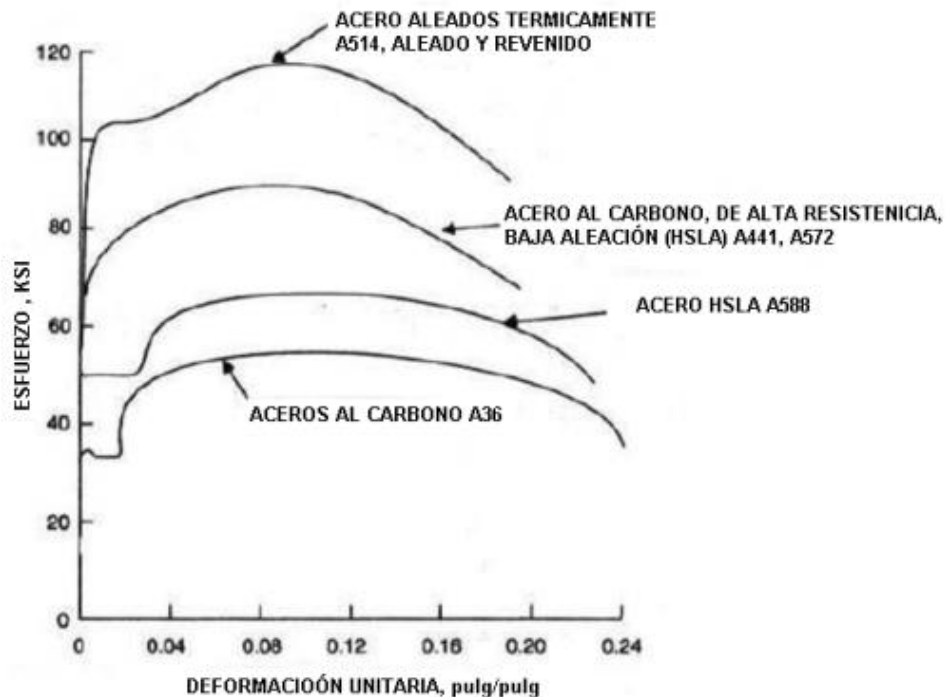


Figura 5.38: Curvas esfuerzo deformación para el acero (American Welding Society (AWS)).

Los ensayos realizados en planchas de acero A36 muestran que los esfuerzos de fluencia son mucho mayores a los valores nominales (Alonso, 1989) por lo tanto no

representan las verdaderas propiedades. En la Fig. 5.43 se muestran diferentes valores de “Fy”, (Alonso, 1989) propuso usar para Fy y Fu valores de 42 y 64 ksi debido a que los aceros estructurales A36 cada vez tienen a ser más resistencia en su fabricación. En el presente trabajo se consideró el esfuerzo de fluencia (σ_y) igual a 42 ksi (2952 kg-f/cm²) para la determinación de propiedades del disipador (formulas de la sección 3.1).

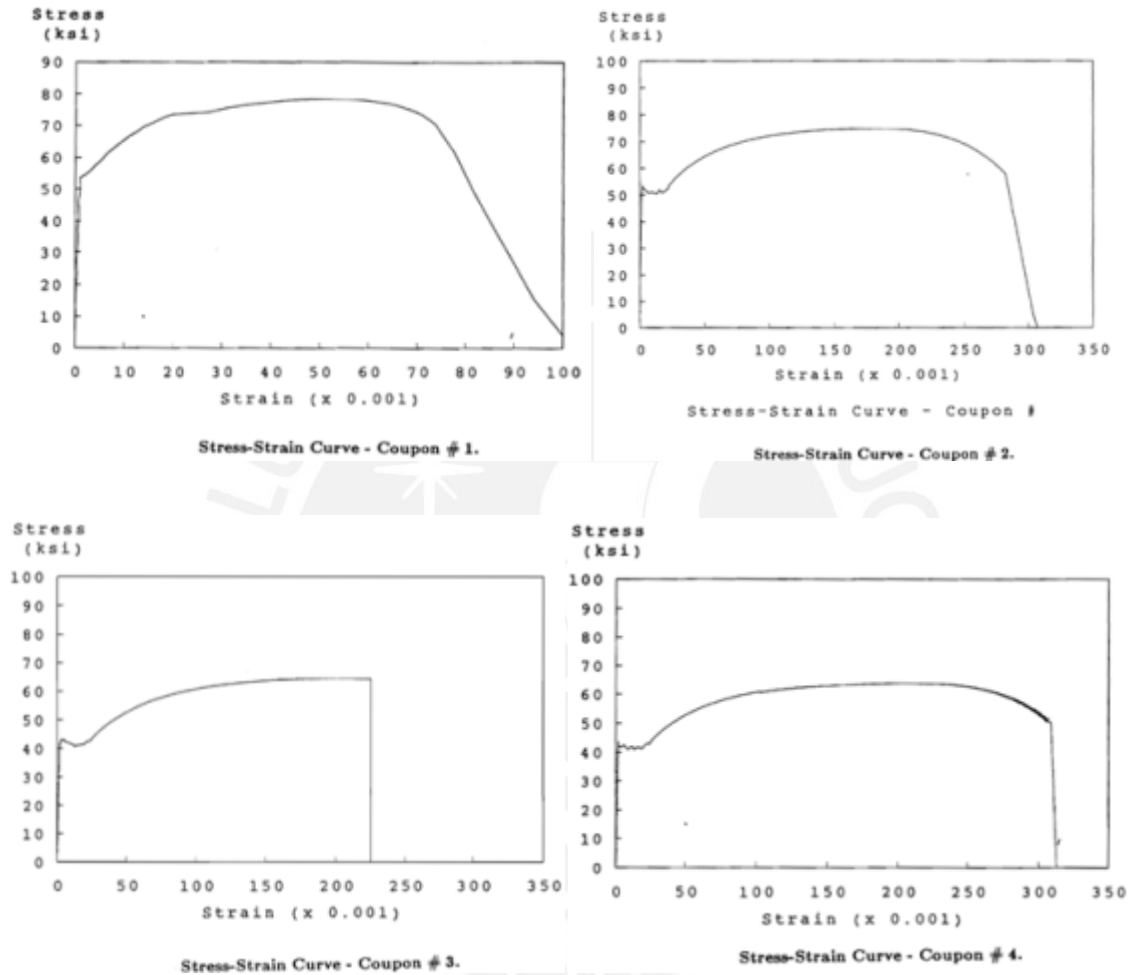


Figura 5.39: Curvas esfuerzo deformación para acero A36 (Alonso, 1989).

5.8.1 Viabilidad de la construcción de disipadores ADAS

Para el proyecto las dimensiones finales son mostradas en la Fig. 5.44, el valor de “v” (espesor de garganta) varía de 0.1L-0.14L, para el presente trabajo fue tomado como 4.5cm (0.12L).

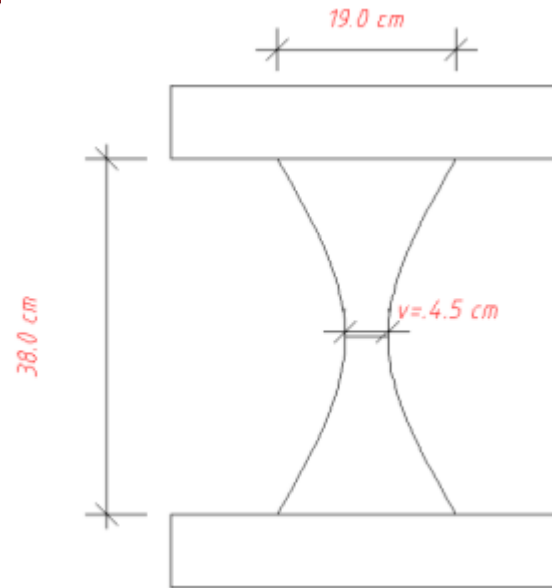


Figura 5.40: Geometría final del dissipador ADAS.

Los espesores de las placas “e” que fueron calculadas en la sección 5.6 son de 25.4 mm y 19 mm (Figs. 5.24 y 5.33). Actualmente en el Perú comercialmente no se encuentra en el mercado los dissipadores ADAS, pero se pueden fabricar utilizando para ello PLANCHAS GRUESAS LAC de acero laminado en caliente de la empresa Aceros Arequipa S.A.C que tiene espesores disponibles en el mercado de 6 mm a 50 mm. Las propiedades y normas de las PLANCHAS GRUESAS LAC se muestran en la Fig. 5.45.

NORMAS TÉCNICAS:

DESIGNACIÓN	NORMAS TÉCNICAS
Comercial	ASTM A1011 Tipo B
Estructural	ASTM A36

PROPIEDADES MECÁNICAS:

CALIDAD	NORMA ASTM	LÍMITE DE FLUENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (kg/cm ²)	ALARGAMIENTO (%) en 50 mm	DOBLADO
Comercial	A1011 TB	2,110–3,510(*)	—	25 mín (*)	a 180°(sobre sí mismo)
Estructural	A36	2,530 mín.	4080-5610	20 mín.	a 180°(opcional) Diámetro Pin = 3e Sentido Laminación

(*) Referencial

Figura 5.41: Características de planchas gruesas LAC (Aceros Arequipa).

El comportamiento del disipador ya es conocido debido a la extensa bibliografía consultada, donde se han realizados ensayos con carga cíclicas que han mostrado buen comportamiento de los disipadores (Alonso, 1989), (Xia C. et al., (1990), (Whittaker et al., 1989), (Scholl, R, 1988), (Su and Hanson, 1990), (Berman and Goel, 1987) y (De la Llera et al., 2004). Por lo tanto el ensayo del comportamiento del disipador no es esencial, solo se tiene que verificar que el acero sea estructural ASTM A36.

Para la fabricación del disipador solo hace falta obtener el valor del esfuerzo de fluencia real (F_y) para lo cual se debe realizar el ensayo de esfuerzo-deformación, si el valor experimental de " F_y " \leq 42 ksi (2952 kg-f/cm²) se debe recalcular las dimensiones; si " F_y " $>$ 42 ksi (2952 kg-f/cm²) no se modifica.

Para la colocación del sistema Chevrom (V invertidos) los perfiles deben colocarse en las bases de las columnas y/o muros con planchas metálicas (Fig.5.46), finalmente se muestra que el reforzamiento con disipadores ADAS es viable y se puede realizar.

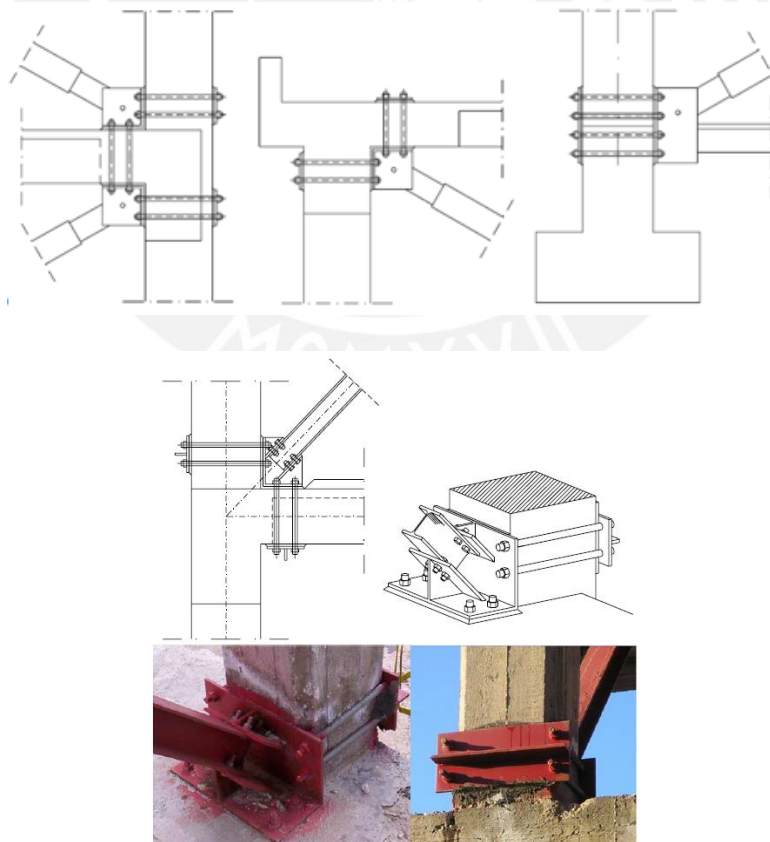


Figura 5.42: Detalles de colocación de refuerzos de sistemas V invertidos, adaptado de (D' Aniello, 2007).

CAPITULO VI

6. Conclusiones y Recomendaciones.

6.1. Conclusiones

1. Se verificó que la edificación de baja altura diseñada con las normas peruanas E030 y EO60 del 2009 no colapsara frente a un sismo severo (0.5g PGA), pero presentará un comportamiento inelástico por corte y falla por flexión en algunos muros de concreto; lo cual produce daño estructural.

2. El comportamiento de vigas y columnas no presentó ninguna falla por flexión y/o corte frente al sismo severo, demostrando que los muros estructurales absorben la mayoría de la respuesta sísmica y controla el diseño.

3. La respuesta inelástica varía con cada registro sísmico utilizado (escalados a una misma aceleración máxima).

4. En el presente trabajo se demostró que la adición de disipadores ADAS en una edificación de baja altura ante un sismo severo (0.5g de PGA) produce una disminución en los periodos de la estructura y una mejora en la respuesta estructural como:

- Reducción de los desplazamientos laterales en el C.M. hasta un 53% (último nivel) como máximo, en PL-01 la reducción fue 70% (último nivel) como máximo.
- Disminución de la deformación en el acero para el muro PL-01 en un 70% (último nivel) evitando una falla por flexión.
- Comportamiento lineal por corte de los muros de concreto reforzado con excepción solo para el sismo S6 en PL-04b donde sobrepasa un 14% al máximo permitido, pero es un margen aceptable.

5. La utilización de un registro sintético que simula un espectro de aceleraciones de la norma E.030 da valores un poco menores a los obtenidos por los 6 registros usados en el presente trabajo, pero puede ser utilizado en análisis tiempo historia para ahorrar el tiempo del procesamiento (para estructuras con periodos cortos).

6. El aumento de fuerza basal es mínimo y variable (llegando incluso a ser menor en algunos sismos) y se da solo en el sentido más flexible (H2). La fuerza basal en H1 es mayor que en H2 debido a que tiene menor disipación de energía.

7. Se verifico un aumento del amortiguamiento viscoso equivalente, llegando a ser como máximo de 24.71% en H2 y 9.52% en H1.

8. Para el diseño y colocación de los disipadores no hay método o procedimiento establecido, se hizo de forma iterativa variando posición y dimensiones hasta reducir las deformaciones límites excedidas. La fabricación de los disipadores ADAS es viable, solo se necesita cumplir las siguientes condiciones:

- El material de las placas del disipador deben ser de acero estructural A36.
- Se debe conocer el valor real del esfuerzo de fluencia “Fy”.

6.2. Recomendaciones.

1. Extender el análisis de diseño de disipadores ADAS para edificaciones de albañilería confinada, debido a que en las zonas periféricas de Lima, la mayoría de las construcciones son de albañilería llegando hasta los 5 niveles y muchas de ellas pueden estar en peligro de colapso o sufrir daños irreparables frente a un sismo severo.

2. Realizar análisis no lineal para edificios de ductilidad limitada (MDL) para evaluar el comportamiento no lineal por corte en los muros de concreto y ver posibilidad de hacer el reforzamiento con disipadores de energía.

3. Para zonas fuera de Lima, especialmente en la costa peruana investigar el reforzamiento con disipadores utilizando acelerogramas artificiales que se ajusten a los sismos propios de cada zona.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, L. J. (1989). "Mechanical Characteristics of X-Plate Energy Dissipators." CE 299 Report, University of California, Berkeley, CA.

ASCE 7-05 (2006). American Society of Civil Engineers. ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, VA.

ASCE 41-06 (2006). Supplement No. 1, American Society of Civil Engineers. ASCE 41-06 Seismic Rehabilitation of Buildings Supplement No. 1.

Applications in the National Earthquake Hazards Reduction Program (1977-1987). U.S. Geological Survey Open File, Report N° 88-13-A, San Diego, CA.

Bergman, D. M., and Goel, S. C. (1987). Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Device for Added Damping and Stiffness. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Bozzo, L. M., Barbat, A.H., (1999). Diseño Sismorresistente de Edificios, Editorial Reverte S.A., Barcelona.

CSI, (2011). "PERFORM 3D: Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures", Version 5, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

Chopra A.K (1995). Dynamics of Structures, Prentice Hall, New Jersey.

Constantinou, M.C., Symans, M.D., Tsopeles, P. and Taylor, D.P., (1993). Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation. Proceedings ATC 17-1 on Seismic Isolation, Passive and Active Control, 2, 581-592.

Craig JI, Goodno BJ, Towashiraporn P, Park J., (2002). Response modification applications for essential facilities, Mid-America Earthquake Center Project ST-4 Final Report.

D'Aniello, Mario (2008). "Steel dissipative bracing systems for seismic retrofitting of existing structures: theory and testing". Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli Federico II.

De la Llera J. C., Esguerra C., Almazán J. L., (2004). Earthquake behavior of structures with copper energy dissipaters. Earthquake Engng Struct. Dynamics; 33:329–358.

Dobson S, Noori M, Hou Z, Dimentberg M, Baber T, (1997). Modeling and random vibration analysis of SDOF system with asymmetric hysteresis. Int J Non-Lin Mech 32(4):669–80.

El-Sokkary, H., and Galal, K. (2008). “Recent advancement in modeling of RC shear walls.” 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12 pages.

FEMA356 (2000). Washington DC: Federal Emergency Management Agency.

FEMA, (2009). “Quantification of Building Seismic Performance Factors (ATC-63 Project),” FEMA P695, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

FEMA, (2012). NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, FEMA P-751, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Fujita T, editor (1991). Seismic isolation and response control for nuclear and non-nuclear structures. Special Issue for the Exhibition of 11th Int. Conf. on SMRT, Tokyo (Japan).

Gasparini, D. A. and E. H. Vanmarcke (1976). SIMQKE: A Program for Artificial Motion Generation, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Ghodrati Amiri, G., Mohebi, B. and Razavian Amrei, S.A. (2009), Cyclic Loading Deterioration Effect in RC Moment Frames in Pushover Analysis, Proceedings of the Fifth International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-5), Las Vegas, USA, Sept. 22-25.

Hooper, M. W (2009).” Analytical Models for the Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Frames”, Thesis Master of Science, The Pennsylvania State University The Graduate School College of Engineering.

Kelly, J. M., Skinner, R. I., and Heine, A. J., (1972). “Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures.” Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol.5, No 3, pp. 63-88.

Kelly, T.E. (2001). In-Structure Damping and Energy Dissipation Design Guidelines, Holmes Consulting Group, Revision 0, July. Available on www.holmesgroup.com.

Kobori et al., (1990). Development and applications in hysteretic steel dampers, U.S. Patent 4,922,667.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., (1984). Seismic design of bridge piers, Research Report 84-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.

Martinez-Romero E. (1993). Experiences on the use of supplemental energy dissipators on building structures. Earthquake Spectra 9(3):581–624.

Mathcad 14. (2007). PTC Corporate Headquarters, Needham, USA

Muñoz P.A., Tinman B. M., Quiun W. D., (2000). “Riesgo Sísmico de Edificios Peruanos”, II Congreso Nacional de Estructuras y Construcción, Lima, diciembre.

Naish, D. B. (2010).” Testing and Modeling of Reinforced Concrete Coupling Beams”, Thesis for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of California Los Angeles.

NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4 (2010). Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design A Guide for Practicing Engineers.

Otani S., (1980). Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Building Structures, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 333 - 344.

Pall, A.S. and Marsh, C. (1982). Response of friction damped braced frames. Journal of Structural Division, ASCE, 108(9), 1313-1323.

Park, R., Priestley, M.J.N. and Gill, W.D. (1982) “Ductility of Square Confined Concrete Columns”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. 4, pp. 929-950.

Park Y. J., Ang A. H-S., and Wen Y. K. (1987) Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings. Earthquake Spectra: February 1987, Vol. 3, No. 1, pp. 1-26.

PEER/ATC (2010). Modeling acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings (PEER/ATC Report 72-1). Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering.

Perry CL, Fierro EA, Sedarat H, Scholl RE. (1993). Seismic upgrade in San Francisco using energy dissipation devices. Earthquake Spectra; 9(3):559–79.

Powell, G. (2007). Detailed example of a tall shear wall building using CSI’s Perform 3D nonlinear dynamic analysis. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.

Programa de diseño ETABS versión 9.2.2, (2010). Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

Ramberg W. and Osgood W.R. (1943), “Description of stress-strain curves by three parameters”, Technical note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D.C.

Reglamento Nacional de Edificaciones. (2007). “Norma Técnica de Edificación E.060 - Concreto Armado”.

Sadek, F. Mohraz, B. Taylor, A. W. Chung, R. M. (1996). Passive Energy Dissipation Devices for Seismic Applications NISTIR 5923; 59 p.

Scholl, R. (1988) Added Damping and Stiffness Elements for Earthquake Damage and Loss Control. Proceedings of Conference XLI: A Review of Earthquake Research

Soong T.T., Dargush G.F., (1997). Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, Wiley, Chichester, England.

Skinner R. I., Kelly J. M., and Heine A. J., (1975). "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", Earthquake Eng. Struct. Dynamics. 3, 287–296.

Skinner, R.I., Kelly, J.M., and Heine, A.J., (1975), Hysteresis Damper for Earthquake Resistant Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, pp. 287-296.

Skinner RI, Tyler RG, Heine AJ, Robinson WH, (1980). Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes. Bull NZ Soc Earthquake Engng; 13(1):22–36.

Su, Y.F. and Hanson, R.D. (1990), "Seismic response of building structures with mechanical damping device", Report No. UMCE 90-2, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., McNamara, R. J., (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. J. Struct. Engrg., Vol. 134, 3-21.

Takeda T., Sozen M.A. y Nielsen N.N., (1970). "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes", J. Struc. Div. ASCE, Vol. 96, pp. 2557-2573.

Tena, A. (1997), "Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device", Engineering Structures, Vol. 19, No. 10, pp. 811-821.

Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., and Su, Y.-F. (1993). "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction." Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, pp. 505-528.

Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Alonso L. J. and Thompson, C. L. (1989) " Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", Report UCB/EERC-89/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

Xia C., Hanson R. & Wight J. (1990). A study of ADAS element parameters and their influence on earthquake response of building structures. University of Michigan, Ann Arbor, UMCE 90-12.